

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA DE  
GEOGRELHAS DEVIDO A DANOS  
QUÍMICOS CAUSADOS POR RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO  
REICLADOS**

**GABRIEL RIBEIRO SILVESTRE**

D0209G19  
GOIÂNIA-GO  
2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:     Dissertação     Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação: **Dissertação**

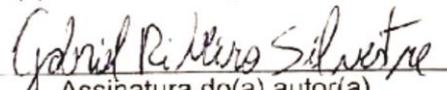
Nome completo do autor: Gabriel Ribeiro Silvestre

Título do trabalho: Redução da resistência de geogrelhas devido a danos químicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados.

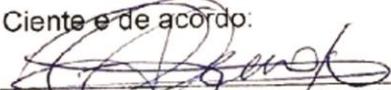
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)

Data: 08 / 08 / 2019

GABRIEL RIBEIRO SILVESTRE

**REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA DE  
GEOGRELHAS DEVIDO A DANOS  
QUÍMICOS CAUSADOS POR RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO  
RECICLADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para defesa e obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Eder. C. G. Santos, M.Sc., D.Sc.

D0209G19  
GOIÂNIA-GO  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silvestre, Gabriel Ribeiro

Redução da resistência de geogrelhas devido a danos químicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados [manuscrito] / Gabriel Ribeiro Silvestre. - 2019.  
147 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2019.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Geogrelhas. 2. Resíduos de construção e demolição reciclados. 3. Dano químico. 4. Condições de saturação. 5. Resistência à tração. I. Santos, Eder Carlos Guedes dos, orient. II. Título.

CDU 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 209 da sessão de Defesa de Dissertação de **Gabriel Ribeiro Silvestre** que confere o título de Mestre(a) em **Geotecnia, Estruturas e Construção Civil**, na área de concentração em **Geotecnia**.

Ao/s **vinte e dois dias do mês de agosto do ano de dois mil e dezenove**, a partir da(s) **14:00**, no(a) **sala de reuniões do LABITECC da Escola de Engenharia Civil e Ambiental**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“Redução da resistência de geogrelhas devido a danos químicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados”**. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Eder Carlos Guedes dos Santos (GECON/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Marcia Maria dos Anjos Mascarenha (GECON/UFG)**, membro titular interno; Professor(a) Doutor(a) **Sérgio Cirelli Angulo (POLI/USP)**, membro titular externo, **cuja participação ocorreu através de videoconferência**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido(a) o(a) candidato(a) **aprovado(a)** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Eder Carlos Guedes dos Santos**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vinte e dois dias do mês de agosto do ano de dois mil e dezenove**.

## TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Eder Carlos Guedes Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 22/08/2019, às 18:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Márcia Maria Dos Anjos Mascarenha, Vice-Coordenadora**, em 23/08/2019, às 14:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **GABRIEL RIBEIRO SILVESTRE, Discente**, em 03/09/2019, às 11:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sérgio Cirelli Angulo, Usuário Externo**, em 03/09/2019, às 17:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A auten?cidade deste documento pode ser conferida no site [h?ps://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0841500** e o código CRC **8A282F75**.

Referência: Processo nº 23070.029640/2019-91

SEI nº 0841500

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho aos meus pais, Jânio Silvestre e Valéria Ribeiro, ao meu irmão Thiago Alexandre, e à minha avó, Luzia do Carmo Arantes.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais Jânio Silvestre e Valéria Ribeiro, ao meu irmão Thiago Alexandre e minha avó Luzia do Carmo Arantes que vivenciaram a pesquisa conjuntamente comigo durante todo o tempo.

Aos meus tios Niltom e William que estenderam a mão quando possível e sempre se dispuseram a ouvir e dar conselhos quando presentes, e ao meu primo Victor Hugo que me incentivou a ingressar no mestrado e mesmo quando não esteve presente, sempre se prontificou a ouvir e discutir sobre o assunto.

Aos meus amigos que sempre estiveram presentes Pedro, Thamis e Lilian que sempre mantiveram o incentivo a realização dessa pesquisa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo fornecimento da bolsa de mestrado concedida durante a realização deste estudo.

Ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GEOCN) e Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG) por ter fornecido as instalações necessárias para a realização de todas as atividades desenvolvidas no mestrado.

Ao meu orientador Eder Santos, que sempre esteve presente durante toda a realização da pesquisa disponibilizando a escutar e dar conselhos para seu prosseguimento, mesmo em momentos de discussões acaloradas e em dias difíceis.

Aos professores do PPG-GECON e da EECA, Marcia Mascarenha, Carlos Lauro, Renato Angelim, Mauricio Sales, Gilson Gitirana, Lilian Rezende, Renata Machado, Frederico da Silva, Andrielli de Oliveira, Helena Carasek, Oswaldo Cascudo e agradeço especialmente o professor Daniel de Lima que abriu as portas do Laboratório de Inovações Tecnológicas em Construção Civil (LABITECC) e esteve presente em outras discussões e necessidades acerca do mestrado sempre dando o melhor apoio possível para o prosseguimento da pesquisa.

Aos meus amigos que dividiram este tempo de mestrado, principalmente aos engenheiros Mailson, Marcela, Mateus, Alexandre e Priscila.

Ao professor Jefferson Lins, por ter aberto as portas do Laboratório de Geossintéticos para a realização dos ensaios de tração descritos neste trabalho, pela confiança conferida a mim e pelo apoio oferecido durante todo o período de estadia. À Clever Valentin, pelo apoio e pela contribuição de Co orientação na pesquisa, e ao Mateus Fleury que me recebeu em São Carlos e esteve presente durante o tempo em que estive na cidade e pelo apoio e realização dos ensaios de tração em São Carlos.

Aos técnicos Vitor, Antônio, Walter, João, Clayton, pelas ajudas concedidas, ensinamentos transmitidos, momentos de diversão e apoio nas atividades realizadas dentro e fora dos laboratórios.

Ao apoio, compreensão e cuidado demonstrados pelos técnicos e servidores Henrique, Agnaldo, Eduardo, “Seu” Lula, Luiz, Adriana e outros que porventura posso ter me esquecido.

Aos parceiros que depositaram sua confiança em mim e investiram nesta pesquisa: FAPEG, pela bolsa de mestrado concedida; CAPES, pelo incentivo a pesquisa; Laboratório de Geotecnia (LABGEO) da Universidade Federal de Goiás (UFG), pela oportunidade de realizar os ensaios em sua estrutura; Laboratório de Inovações Tecnológicas em Construção Civil (LABITECC) pelo apoio fornecido durante a execução dos ensaios experimentais; à Divisão de Transportes da UFG pelo fornecimento de caminhão para o transporte dos RCD-R da usina para a EECA, à RENOVE – Gestão em Resíduos Ltda. (RNV), pelo fornecimento dos RCD-R deste estudo; à HUESKER, pelo fornecimento das geogrelhas; à GOIARTE – Soluções inovadoras em pré-fabricados, pelo fornecimento dos blocos de concreto para a realização da instalação experimental; à VEDACIT Impermeabilizantes, pelo fornecimento dos aditivos impermeabilizantes utilizados no experimento de campo; à SONAF – Fundações e Sondagens pelo fornecimento sacos de cimento e das telhas dos experimento de campo; à BRASIL MINÉRIOS pelo fornecimento de vermiculita para a realização do reboco externo dos experimentos de campo; à LTEC – Laboratório Técnico e Engenharia Ltda. pelo fornecimento pelo fornecimento da mão de obra para construções dos tanques experimentais; e Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), por fornecerem total apoio a realização dos ensaio de tração.

*“Não há fatos eternos, como não há verdades absolutas.”*

*Friedrich Nietzsche*

## RESUMO

O crescimento da construção civil gera um volume cada vez maior de resíduos de construção e demolição (RCD) no ambiente urbano. Estudos recentes vêm mostrando a viabilidade de utilizar esses materiais em estruturas de solo reforçado (ESR) com geossintéticos. Nesse contexto, grande parte desses estudos concentraram-se em investigações dos desempenhos e dos danos mecânicos sofridos pela instalação dos geossintéticos. No entanto, os danos químicos e ambientais nas geogrelhas decorrentes do seu contato com o resíduo de construção e demolição reciclados (RCD-R) ao longo do tempo também são importantes informações para o dimensionamento dessas estruturas. Diante disso, o principal objetivo deste trabalho consistiu em avaliar a redução da resistência de geogrelhas devido a danos químicos causados por RCD-R quando expostas à danificação e a diferentes cenários de saturação. Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização em amostras de RCD-R coletadas numa usina de reciclagem. Experimentos de campo foram construídos com propósito de deixar dois tipos de geogrelha (PET e PVA) em contato com o RCD-R sob três condições de saturação (seca, inundada e exposta à chuva). Corpos de prova das geogrelhas foram exumados em dois momentos (1ª e 2ª exumação), de modo a verificar a ocorrência e intensificação de danos por meio de ensaios de MEV, EDX e resistência à tração. Nas ocasiões de realização das exumações, foram coletadas amostras de RCD-R (para caracterização) e de água (para ensaios químicos). Diante do enfoque geotécnico do estudo, foram realizados os ensaios comumente empregados para a caracterização de solos. Outros ensaios foram feitos para observar as características químicas e de composição do RCD-R (pH e composição gravimétrica). Os resultados da caracterização dos RCD-R mostraram que esses materiais possuem características próximas às de solos granulares, baixa variabilidade dos parâmetros geotécnicos e extratos aquosos com características alcalinas. Verificou-se, por meio do MEV, a impregnação de RCD-R nas geogrelhas; porém, não foi possível identificar tais agregações por análise morfológica e EDX. As análises químicas nos líquidos extraídos dos tanques, nas exumações, indicaram que esse RCD-R poderia ser classificado como não inerte. Os resultados dos ensaios resistência à tração mostraram que as geogrelhas de PET apresentaram uma maior redução de resistência quando submetidas à presença da água de chuva, tendo outros parâmetros (deformação e força a 2% de deformação) sido influenciados de maneira distinta. Os resultados das geogrelhas de PVA (2ª exumação) mostraram que apenas a amostra danificada e em contato de água da chuva não apresentou redução de resistência. Em relação aos outros parâmetros dessa geogrelha, observou-se que a presença e o tipo de água causaram alterações diversas. Conclui-se que a presença de água foi o fator mais expressivo na mudança de resistência das geogrelhas quando em contato com o RCD-R, com o efeito de tal fator sido intensificado nas amostras danificadas. Contudo, os fatores de redução observados poderiam ser implementados na fase de projeto de ESR com geossintéticos, demonstrando, assim, que RCD-R poderia ser empregado como um material de preenchimento ambientalmente correto.

**Palavras-chave:** RCD-R. Geogrelha. Dano químico. Condição de saturação. Resistência à tração.

## ABSTRACT

The growth of construction generates an increasing volume of construction and demolition waste (CDW) in the urban environment. Recent studies have shown the feasibility of using these materials in reinforced soil structures (RSS) with geosynthetics. In this context, most of these studies focused on investigations of the performance and mechanical damage suffered by geosynthetics during installation. However, chemical and environmental damage to geogrids from contact with the recycled construction and demolition waste (RCDW) over time is also important information for the design of these structures. Therefore, the main objective of this work was to evaluate the reduction of geogrid tensile strength due to chemical damage caused by RCDW when exposed to damage and different saturation scenarios. Characterization tests were performed on RCDW samples collected from a recycling plant. In-field test facilities were constructed to allow two types of geogrid (PET and PVA) being in contact with RCDW under three saturation conditions (dry, saturated and exposed to rain). Geogrid specimens were exhumed at two moments (1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> exhumations) to verify the occurrence and intensification of damage using SEM, EDX and tensile strength tests. During the exhumations, samples of RCDW and water were collected to geotechnical and chemical tests, respectively. Given the geotechnical focus of this study, tests commonly used for soil characterization were performed. Other tests were carried out to observe the chemical and composition characteristics of RCDW (pH and gravimetric composition). The results of the RCDW characterization showed characteristics very similar to those of granular soils, low variability of geotechnical parameters and alkaline characteristics. The SEM results showed the impregnation of RCDW on the geogrids. However, it was not possible to identify such aggregations by morphological analysis and EDX. Chemical analyzes in the liquids extracted from the in-field test facility during the exhumations processes indicated that RCDW could be classified as non-inert material. The tensile test results showed that PET geogrids presented a greater reduction of strength when exposed to the rainwater contact. Other parameters (strain and strength at 2% strain) were influenced differently. The results of PVA geogrids (2<sup>nd</sup> exhumation) showed that only the damaged samples in contact with rainwater showed no strength reduction. Regarding to other parameters evaluated of PVA geogrid, it was observed that the presence and type of water caused diverse changes. It is possible to conclude that the contact with water was the most significant factor in the geogrid strength changes when in contact with RCDW, with the effects being intensified on the damaged samples. However, the reduction factors observed could be implemented to designing RSS using RCDW and geosynthetics, thus demonstrating that RCDW could be employed as a friendly environmental backfill material.

**Key-Words:** RCDW. Geogrid. Chemical damage. Saturation condition. Tensile strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curvas granulométricas do RCD-R em São Carlos-SP (Santos, 2007).....	34
Figura 2.2 – Curvas granulométricas do RCD-R em Brasília-DF (Santos, 2011). Nota: a amostra RCD-04 foi coletada num canteiro de obra que produzia RCD-R .....	34
Figura 2.3 – Curva granulométrica do RCD-R em Recife-PE (Araújo Neto, 2017).....	35
Figura 2.4 – Curva granulométrica do RCD-R em Camaragibe-PE (Barbosa, 2017).....	36
Figura 2.5 – Curva granulométrica do RCD-R da região metropolitana de Goiânia-GO (Fleury, 2018) .....	36
Figura 2.6 – Relação entre o pH e o tempo do experimento nas condições saturadas e não saturadas – modificado pelo autor (Towsend, Jang e Thurn, 1999).....	40
Figura 2.7 – Relação entre a concentração de $\text{CaCO}_3$ e o tempo, no lixiviado do RCD – modificado pelo autor (Towsend, Jang e Thurn, 1999).....	41
Figura 2.8 – Variação de pH para componentes do RCD ao longo do tempo – modificado pelo autor (Towsend, Jang e Thurn, 1999).....	41
Figura 2.9 – Fórmulas químicas do álcool polivinílico (PVA) e do poliéster (PET). (Próprio autor) .....	52
Figura 2.10 – Mecanismo de degradação do PET por hidrólise – modificado pelo autor (Carneiro, 2009) .....	53
Figura 2.11 – Mecanismo de degradação do PVA por oxidação – modificado pelo autor (Nishiyama, Yamamoto e Hoshiro, 2006).....	54
Figura 2.12 – Tempo de vida versus resistência à tração – modificado pelo autor (HUFENUS <i>et al.</i> 2005).....	55
Figura 2.13 – Comparação entre as curvas de tensões de geogrelhas intactas e exumadas – modificado pelo autor (VIEIRA e PEREIRA, 2015a) .....	64
Figura 3.1 – Detalhe do BGS fino obtido na usina de beneficiamento. (bloco cerâmico com dimensões de 140 x 1240 mm). (Próprio autor) .....	66
Figura 3.2 – Desenho esquemático dos tanques experimentais.....	68

Figura 3.3 – Construção do experimento de campo: (a) blocos de concreto assentados com chapisco externo realizado; e (b) realização do teste de estanqueidade. (Próprio autor).....	69
Figura 3.4 – Visão da cobertura dos tanques experimentais. (Próprio autor) .....	70
Figura 3.5 – Detalhe da selagem das geogrelhas. (Próprio autor).....	72
Figura 3.6 – Preenchimento dos tanques experimentais: – (a) detalhe da instalação de filtro (brita 0 e geotêxtil não tecido) próximo ao tubo de coleta; e (b) instalação de amostra de geogrelha e camada de RCD-R no tanque chuva. (Próprio autor).....	72
Figura 3.7 – Imagem por satélite da EECA-UFG contendo a localização da estação meteorológica e do experimento de campo – modificado pelo autor (MAPA FÁCIL, 2019).....	74
Figura 4.1 – Resultados de ensaios de granulometria: (a) curvas granulométricas das amostras de RCD-R, e (b) coeficientes de variação para os diâmetros das partículas do RCD-R. (Próprio autor).....	78
Figura 4.2 – Curvas de compactação dos RCD-R de controle. (Próprio autor) .....	80
Figura 4.3 – Resultados de ensaios de granulometria: (a) Curvas granulométricas das amostras do RCD-R empregados nos tanques experimentais; e, (b) Coeficientes de variação dos diâmetros das partículas do RCD-R. (Próprio autor) .....	84
Figura 4.4 – Curvas de compactação das amostras de preenchimento dos tanques experimentais. (Próprio autor).....	86
Figura 4.5 – Resultados de ensaios de granulometria: (a) Curvas granulométricas das amostras do RCD-R empregados nos tanques experimentais após a 2ª exumação; e, (b) Curvas granulométricas das amostras do RCD-R empregados nos tanques experimentais no momento do preenchimento e após a 2ª exumação; e (c) Coeficientes de variação dos diâmetros das partículas do RCD-R após a 2ª exumação. (Próprio autor).....	89
Figura 4.6 – Resultados dos ensaios de pH nos tanques experimentais. (Próprio autor) .....	94
Figura 4.7 – Resultados dos valores de temperatura nos tanques experimentais e do ar. (Próprio autor) .....	94
Figura 4.8 – Resultados dos valores de pH do tanque inundado para diferentes alturas de coleta. (Próprio autor).....	95

- Figura 4.9 – Resultados dos valores de pH do tanque chuva para diferentes alturas de coleta. (Próprio autor)..... 95
- Figura 4.10 – Imagens de MEV com aumento de 50 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor)..... 98
- Figura 4.11 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor)..... 99
- Figura 4.12 – Imagens de MEV com aumento de 1000 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor)..... 100
- Figura 4.13 – Imagens de MEV com aumento de 50 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor)..... 101
- Figura 4.14 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor)..... 102

Figura 4.15 – Imagens de MEV com aumento de 1000 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor)..... 103

Figura 4.16 – Imagens de MEV com aumento de 50 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor)..... 105

Figura 4.17 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor)..... 106

Figura 4.18 – Imagens de MEV com aumento de 1000 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor)..... 107

Figura 4.19 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras virgens contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor) ..... 109

Figura 4.20 – Gráficos das análises de EDX das amostras virgens contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor)..... 110

Figura 4.21 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras do tanque chuva da 1ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são

respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor) .....	112
Figura 4.22 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque chuva da 1ª exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor) .....	113
Figura 4.23 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque inundado da 1ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor) .....	114
Figura 4.24 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque inundado da 1ª exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor) .....	115
Figura 4.25 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque seco da 1ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor).....	116
Figura 4.26 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque seco da 1ª exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor) .....	117
Figura 4.27 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque chuva da 2ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor) .....	118
Figura 4.28 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque chuva da 2ª exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor) .....	119
Figura 4.29 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque inundado da 2ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor) .....	120

Figura 4.30 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque inundado da 2 <sup>o</sup> exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor).....	121
Figura 4.31 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque seco da 2 <sup>a</sup> exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor).....	122
Figura 4.32 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque seco da 2 <sup>a</sup> exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor) .....	123
Figura 4.33 – Imagens de MEV com aumento de 1000 e 5000 vezes em amostras que evidenciaram a existência de etringita contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) aumento de 1000 vezes em amostra de PET sem danificação de instalação do tanque inundado da 2 <sup>a</sup> exumação; (b) aumento de 1000 vezes em amostra de PVA com danificação de instalação do tanque chuva da 1 <sup>a</sup> exumação; (c) aumento de 5000 vezes em amostra de PET sem danificação de instalação do tanque inundado da 2 <sup>a</sup> exumação; (d) aumento de 5000 vezes em amostra de PVA com danificação de instalação do tanque chuva da 1 <sup>a</sup> exumação. (Próprio autor) ...	124
Figura 4.34 – Gráficos das análises de EDX das amostras que evidenciaram a existência de etringita contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor) .....	125
Figura 4.35 – Resultados da tensão de ruptura das geogrelhas de PET. (Próprio autor) .....	126
Figura 4.36 – Resultados da deformação na ruptura das geogrelhas de PET. (Próprio autor).....	128
Figura 4.37 – Resultados do módulo de rigidez à 2% da deformação das geogrelhas de PET. (Próprio autor) .....	130
Figura 4.38 – Resultados da tensão de ruptura das geogrelhas de PVA. (Próprio autor).....	132
Figura 4.39 – Resultados da deformação na ruptura das geogrelhas de PVA. (Próprio autor).....	134
Figura 4.40 – Resultados do módulo de rigidez à 2% da deformação das geogrelhas de PVA. (Próprio autor) .....	136

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de massa específica dos sólidos de RCD-R. (Próprio autor).....	37
Tabela 2.2 – Valores de $\rho_{d_{\max}}$ e $w_{ot}$ de alguns RCD-R. (Próprio autor) .....	38
Tabela 2.3 – Fatores de redução de resistência da geogrelha à danos causados por RCD-R (Santos, 2011) .....	63
Tabela 3.1 – Coletas realizadas. (Próprio autor) .....	66
Tabela 3.2 – Características das geogrelhas de PET e PVA/PA fornecidas pelo fabricante. (Próprio autor) .....	67
Tabela 3.3 – Dados das camadas de geogrelha (tipos de polímeros, estado inicial de instalação das amostras e período de contato com o RCD-R). (Próprio autor).....	71
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos dos RCD-R de controle. (Próprio autor) .....	77
Tabela 4.2 – Classificação SUCS dos RCD-R de controle. (Próprio autor) .....	78
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de compactação dos RCD-R de controle. (Próprio autor).....	80
Tabela 4.4 – Composição gravimétrica classificada por tipos de materiais. (Próprio autor).....	81
Tabela 4.5 – Resultados da análise gravimétrica de acordo com as classes determinadas pela resolução CONAMA 307/2002. (Próprio autor) .....	82
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de pH. (Próprio autor).....	82
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos do RCD-R empregado no preenchimento dos tanques experimentais. (Próprio autor).....	83
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de compactação do RCD-R de preenchimento. (Próprio autor) .....	86
Tabela 4.9 – Composição gravimétrica classificada por tipo de materiais para as amostras de preenchimento dos tanques. (Próprio autor).....	87
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de pH do RCD-R de preenchimento. (Próprio autor).....	87

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos dos RCD-R da 2ª exumação. (Próprio autor) .....	88
Tabela 4.12 – Composição gravimétrica classificada por tipo de materiais para as amostras da 2ª exumação dos tanques. (Próprio autor) .....	92
Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios de pH do RCD-R de preenchimento. (Próprio autor).....	92
Tabela 4.14 – Resultados dos metais analisados para cada tanque no momento da exumação. (Próprio autor) .....	96
Tabela 4.15 – Resultados dos fatores de redução e dos fatores de ganho das geogrelhas de PET. (Próprio autor) .....	130
Tabela 4.16 – Resultados dos fatores de redução e dos fatores de ganho das geogrelhas de PVA/PA. (Próprio autor) .....	136

## LISTA DE ABREVIATURAS

A/C	Relação água-cimento;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
Al	Alumínio;
As	Arsênio;
B	Boro;
BGS	Brita graduada simples;
Br	Bromo;
BS	<i>British Standard</i> ;
C	Carbono;
Ca	Cálcio;
Cd	Cádmio;
Cl	Cloro;
COD	Carbono orgânico dissolvido;
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente;
Cr	Cromo;
CSH	Hidrato de silicato de cálcio;
Cu	Cobre;
CV	Coefficiente de variação;
DA	Direito alto;
DB	Direito baixo;
DF	Distrito Federal;
DM	Direito médio;
DRX	Difratometria de raios X;
EA	Esquerdo alto;

EB	Esquerdo baixo;
EDX	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia;
EECA	Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás;
EM	Esquerdo médio;
EMC	Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás;
ESR	Estrutura de solo reforçado;
F	Flúor;
Fe	Ferro;
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i> ;
FRX	Fluorescência de raios X;
GGPET	Geogrelha(s) de poliéster;
GGPVA	Geogrelha(s) de álcool polivinílico;
GO	Goiás;
H	Hidrogênio;
Hg	Mercúrio;
K	Potássio;
MEV	Microscópio eletrônico de varredura;
Mg	Magnésio;
Na	Sódio;
NBR	Norma Brasileira Regulamentar;
O	Oxigênio;
OH	Hidroxila;
PA	Poliamida;
Pb	Chumbo;
PE	Pernambuco;
PEAD	Polietileno de alta densidade;
PET	Poliéster;
pH	Potencial hidrogeniônico;

PP	Polipropileno;
PVA	Álcool polivinílico;
PVC	Policloreto de vinila;
RCD	Resíduos de Construção e Demolição;
RCD-R	Resíduos de Construção e Demolição Reciclados;
S	Enxofre;
S	<i>South</i> ;
Sb	Antimônio;
Si	Silício;
SP	São Paulo;
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos;
SWM	<i>Standard Methods for the examination of Water and Wastewater</i> ;
TC	Tanque chuva;
TC-1EX	1ª exumação do tanque chuva;
TC-2EX	2ª exumação do tanque chuva;
TI	Tanque inundado;
Ti	Titânio;
TI-1EX	1ª exumação do tanque inundado;
TI-2EX	2ª exumação do tanque inundado;
TS	Tanque seco;
TS-1EX	1ª exumação do tanque seco;
TS-2EX	2ª exumação do tanque seco;
UFG	Universidade Federal de Goiás;
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> ;
USP	Universidade de São Paulo;
W	<i>West</i> ; e
Zr	Zircônio.

## LISTA DE SÍMBOLOS

°	Grau(s);
'	Minuto(s);
”	Segundo(s);
kV	Quilovolt(s);
kN	Quilonewton(s);
kN/m	Quilonewton(s) por metro;
m	Metro(s);
dm	Decímetro(s);
mm	Milímetro(s);
km	Quilometro(s);
m <sup>3</sup>	Metro(s) cúbico(s);
°C	Grau Celsius;
g	Gramas(s);
kg	Quilograma(s);
g/m <sup>2</sup>	Gramas(s) por metro ao quadrado;
g/cm <sup>3</sup>	Gramas(s) por centímetro ao cubo;
g/dm <sup>3</sup>	Gramas(s) por decímetro ao cubo;
mg/L	Miligramas(s) por litro;
p	Nível de confiança;
t	Tempo;
$\mu$	Média populacional;
$\rho$	Massa específica;
$\rho_{d\ máx}$	Massa específica seca máxima;
$w_{ot}$	Umidade ótima;
T	Valor do limite dado pelo intervalo de confiança;

$\bar{X}$	Média amostral;
$t_{\alpha/2}$	Valor da distribuição de Student padronizada;
$s$	Desvio padrão;
$n$	Número de amostras;
%	Percentual;
$FR$	Fator de redução;
$T_{m\acute{a}x}$	Resistência à tração máxima;
$T_{proj}$	Resistência à tração de projeto;
$T_{req}$	Resistência à tração requerida;
$T_{\alpha}$	Resistência à tração disponível;
$f_{cr}$	Fator de redução parcial para fluência em tração;
$f_{mr}$	Fator de redução parcial para danos mecânicos de instalação;
$f_a$	Fator de redução ambiental;
$f_m$	Fator de resistência parcial para incertezas estatísticas na determinação da resistência do geossintético; e
$T_{\alpha}$	Resistência à tração última.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>1.1JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>28</b>
<b>1.2OBJETIVOS .....</b>	<b>28</b>
<b>1.3ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1CLASSIFICAÇÕES E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS RCD-R.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.1Classificações para o RCD-R.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.2RCD-R produzidos na região metropolitana de Goiânia-GO.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS RCD-R.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS RCD-R .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.1Comportamento do potencial hidrogeniônico (pH) do RCD e/ou RCD-R.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.2Composição dos RCD-R.....</b>	<b>43</b>
2.3.2.1 Concretos e argamassas.....	44
2.3.2.2 Cerâmicas .....	46
2.3.2.3 Gesso .....	46
2.3.2.4 Madeira.....	48
2.3.2.5 Solo.....	49
<b>2.4DEGRADAÇÃO QUÍMICA DAS GEOGRELHAS DE PET E PVA.....</b>	<b>50</b>
<b>2.4.1Características gerais das geogrelhas .....</b>	<b>50</b>
<b>2.4.2Propriedades dos polímeros utilizados nos geossintéticos e mecanismos de degradação do PET e do PVA .....</b>	<b>50</b>
<b>2.4.3Fatores de redução .....</b>	<b>54</b>
<b>2.4.4Dano de instalação .....</b>	<b>57</b>
<b>2.4.5Fatores da degradação química e ambiental.....</b>	<b>58</b>
2.4.5.1 Ação de líquidos.....	58

2.4.5.2	Ação da temperatura.....	58
2.4.5.3	Contato com o oxigênio .....	59
2.4.5.4	Ação dos microrganismos .....	59
<b>2.4.6</b>	<b>Degradação química e ambiental .....</b>	<b>60</b>
<b>2.4.7</b>	<b>Sinergia entre a degradação mecânica e química causada por RCD-R.....</b>	<b>62</b>
<b>CAPÍTULO 3 MATERIAIS E METODOS .....</b>		<b>65</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1.1</b>	<b>RCD-R .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Geogrelhas.....</b>	<b>66</b>
<b>3.2</b>	<b>MÉTODOS.....</b>	<b>67</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Determinação dos parâmetros geotécnicos, químicos e de composição dos RCD-R .....</b>	<b>67</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Construção do experimento de campo .....</b>	<b>68</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Simulação de danos de instalação e disposição das amostras de geogrelhas .....</b>	<b>70</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Análises dos materiais extraídos dos tanques experimentais .....</b>	<b>73</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Obtenção dos dados meteorológicos – Temperatura do ar .....</b>	<b>74</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Tratamento dos dados resultantes dos ensaios de tração nas geogrelhas .....</b>	<b>75</b>
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>		<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA, QUÍMICA E DE COMPOSIÇÃO DOS RCD-R .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Massa específica dos sólidos.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Análise granulométrica .....</b>	<b>78</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Índices de Consistência .....</b>	<b>79</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Compactação.....</b>	<b>80</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Composição gravimétrica .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1.6</b>	<b>Potencial hidrogeniônico.....</b>	<b>82</b>
<b>4.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA, QUÍMICA E DE COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RCD-R EMPREGADO NOS TANQUES EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>83</b>

4.2.1	Massa específica dos sólidos.....	83
4.2.2	Análise granulométrica .....	84
4.2.3	Índices de Consistência .....	85
4.2.4	Compactação.....	85
4.2.5	Composição gravimétrica .....	86
4.2.6	pH.....	87
4.3	<b>CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA, QUÍMICA E DE COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RCD-R DA 2ª EXUMAÇÃO.....</b>	<b>88</b>
4.3.1	Massa específica dos sólidos.....	88
4.3.2	Análise granulométrica .....	88
4.3.3	Índices de Consistência .....	91
4.3.4	Composição gravimétrica .....	91
4.3.5	pH.....	92
4.4	<b>ANÁLISES DE PROPRIEDADES E PARÂMETROS DOS LÍQUIDOS EXTRAÍDOS DOS EXPERIMENTOS DE CAMPO .....</b>	<b>93</b>
4.4.1	Análises de pH, temperatura e condições de saturação no decorrer do experimento de campo .....	93
4.4.2	Análise das variações de pH por diferentes alturas de coleta .....	94
4.4.3	Análise dos parâmetros dos líquidos.....	96
4.5	<b>ENSAIOS DE MEV .....</b>	<b>97</b>
4.5.1	Tanque chuva (TC).....	97
4.5.2	Tanque inundado (TI).....	100
4.5.3	Tanque seco (TS) .....	104
4.6	<b>ENSAIOS DE EDX.....</b>	<b>108</b>
4.6.1	Geogrelhas virgens .....	108
4.6.2	Geogrelhas da primeira exumação .....	110
4.6.3	Geogrelhas da segunda exumação .....	117
4.6.4	Geogrelhas com etringita .....	123
4.7	<b>DANOS NAS GEOGRELHAS – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....</b>	<b>125</b>

<b>4.7.1 Geogrelhas de PET (GGPET) .....</b>	<b>125</b>
<b>4.7.2 Geogrelhas de PVA (GGPVA) .....</b>	<b>131</b>
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>137</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>137</b>
<b>5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>141</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Desde o surgimento dos geossintéticos, o seu estudo e a sua utilização vêm ganhando força e se difundindo em vários setores da Indústria da Construção Civil (ICC). Como exemplo disso, pode-se afirmar que a sua utilização já é consolidada em obras de estruturas de solo reforçado (ESR). Contudo, vale ressaltar que, para que os geossintéticos ganhassem esse espaço, foi necessária a realização de diversos estudos e testes, ao longo das décadas, capazes de avaliar principalmente o seu desempenho e a sua durabilidade.

Com o crescimento da demanda de bens produzidos pela indústria da construção civil (ICC), o ambiente urbano tem produzido um volume cada vez maior de resíduos provenientes de novas construções, reformas e demolições, os chamados 'resíduos de construção e demolição' (RCD). Nesse cenário, a postura de não reciclar tais resíduos mostra-se bastante inadequada, uma vez que isso faz com que novas jazidas de materiais para a construção civil sejam exploradas e estimula a incorreta deposição dos resíduos nos grandes centros urbanos.

Nas grandes cidades, os RCD usualmente constituem a maior parte dos resíduos sólidos gerados. Nesse contexto, a maior parcela é proveniente de resíduos de obras de pequeno porte, onde normalmente não existe sequer o acompanhamento de um engenheiro civil e esse resíduo acaba sendo destinado para terrenos impróprios próximos a tais obras. Essa deposição inadequada dos RCD pode, em alguns casos, ser associada à proliferação de agentes patogênicos e ao assoreamento de rios e de córregos, além de outros impactos para a sociedade.

Diante desse cenário, recentemente, estudos têm sido realizados com a finalidade de mostrar a viabilidade de utilização dos resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em obras geotécnicas, uma vez que uma parcela significativa desses materiais pode ser constituída de solo. Dentre tais obras objetos de estudo, estão as estruturas de solo reforçado (ESR) com geossintéticos, as quais poderiam utilizar um expressivo volume de RCD-R como material de preenchimento.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Os geossintéticos são produtos que possibilitam reduzir a necessidade de exploração de novas jazidas de matéria-prima para a indústria da construção civil (ICC), uma vez que a sua utilização diminui de maneira considerável a quantidade de materiais naturais – como areia e/ou brita – numa obra geotécnica. Ziegler (2017), ao estudar aplicações de geogrelhas em reforço de solo ao longo da história, afirma que esta é uma técnica reconhecidamente utilizada para reduzir recalques e aumentar a capacidade de carga em um solo local mecanicamente inadequado.

Assim como os geossintéticos, os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) aparecem como um versátil material de construção, uma vez que podem ser empregados dentro da própria ICC. Estudos mais recentes, realizados com o objetivo de avaliar o uso dos RCD-R em estruturas de solo reforçado (ESR) com geossintéticos (Santos, Palmeira e Bathurst, 2013; e Santos, Palmeira e Bathurst, 2014), verificaram a viabilidade do emprego desses novos materiais de preenchimento. No entanto, para garantir o emprego dos RCD-R neste compósito (RCD-R + geossintético), faz-se necessário caracterizar não só os seus parâmetros físicos e mecânicos, mas também os seus parâmetros químicos, dado que os RCD-R podem ter um papel determinante na durabilidade e no desempenho dos geossintéticos ao longo do tempo.

## **1.2 OBJETIVOS**

Diante do exposto, o principal objetivo deste trabalho é estudar a redução da resistência de geogrelhas devido aos danos químicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R). Dentre os objetivos específicos deste trabalho, pode-se destacar:

- Caracterizar os parâmetros geotécnicos e químicos de RCD-R;
- Analisar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, químicos (pH) e de composição do RCD-R;
- Analisar a variação dos parâmetros geotécnicos e químicos do RCD-R ao longo do tempo e da condição de exposição no campo;

- Investigar a ocorrência de redução de resistência à tração de geogrelhas submetidas a diferentes condições de contato com RCD-R; e
- Definir fatores de redução de resistência devido a danos químicos causados por RCD-R em geogrelhas, do modo a viabilizar o emprego desses materiais reciclados como material de preenchimento.

### **1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO**

Este documento encontra-se estruturado em cinco capítulos buscando fornecer ao leitor, de forma concisa, os conhecimentos básicos necessários para o entendimento do estudo, os materiais utilizados, as considerações específicas para a realização dos experimentos, os resultados e as conclusões obtidas.

No Capítulo 1 está apresentado a contextualização do tema do estudo, sua justificativa e os objetivos principal e específicos a serem atingidos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica a respeito dos assuntos abordados no estudo proposto. O capítulo está dividido em duas partes: i) a primeira aborda a gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD), a sua reciclagem e as características geotécnicas, químicas e de composição; ii) a segunda parte é pertinente aos materiais geossintéticos e versa sobre os mecanismos de degradação química do material – com foco no dano de instalação, dano químico e dano ambiental em campo e laboratório –, por meio de resultados obtidos de outros estudos.

Em seguida, no Capítulo 3, serão descritos os materiais empregados no estudo (RCD-R e geogrelhas), a construção da instalação experimental, a metodologia utilizada na simulação dos danos, os métodos adotados para a realização das análises geotécnicas, químicas e de composição, a obtenção e tratamento dos dados pluviométricos e os procedimentos adotados para a sua quantificação dos danos – definição de fatores de redução – nas geogrelhas utilizadas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da caracterização geotécnica, químicas e de composição do RCD-R coletados numa usina de reciclagem. O capítulo também apresenta os resultados

dos ensaios de tração em geogrelha, os danos observados por ensaios de microscopia e análises químicas e os fatores de redução para os cenários investigados.

Por fim, no Capítulo 5 estão apresentadas as conclusões do estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 CLASSIFICAÇÕES E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS RCD-R**

Este capítulo aborda as classificações dos RCD-R segundo as suas características de composição gravimétrica e química; apresenta-se também as suas propriedades geotécnicas, expondo as eventuais variabilidades em função dos resultados obtidos de outros estudos. Também será caracterizada a produção dos RCD-R e materiais beneficiados numa usina localizada na região metropolitana de Goiânia-GO.

##### **2.1.1 Classificações para o RCD-R**

A Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) representou um marco ao determinar os critérios de classificação geral dos resíduos de construção e demolição (RCD). Vale ressaltar que a Resolução 307 (CONAMA, 2002), ao longo de sua existência, foi sendo atualizada e passou a considerar também outras resoluções do CONAMA em seu texto – resoluções 348 (CONAMA, 2004), 431 (CONAMA, 2011), 448 (CONAMA, 2012) e 469 (CONAMA, 2015).

Segundo a Resolução 307 (CONAMA, 2002), os RCD podem ser classificados como: i) Classe A, composta por aqueles que apresentam possibilidade de reciclagem e reutilização como agregados na construção civil (por exemplo: materiais provenientes de concreto, de betume, de rochas alteradas, etc.); ii) Classe B (modificada pela Resolução CONAMA 469/2015), composta por materiais que podem ser reciclados para outras destinações (por exemplo: materiais como vidro, gesso, metal, plástico, madeira, papel, etc.); iii) Classe C (modificada pela Resolução CONAMA 431/2011), que não apresentam possibilidade ou viabilidade de reciclagem e reutilização e devem ser destinados aos aterros sanitários (por exemplo: materiais como tecido, carvão, espuma, isopor, etc.); e iv) Classe D, composta por

resíduos que apresentam alguma periculosidade (por exemplo: materiais como tintas, solventes, etc.).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são classificados quimicamente em Classe I – Perigosos –, e Classe II – Não perigosos. Segundo essa norma, os resíduos são classificados como perigosos quando, em função de suas propriedades físicas, químicas e infectocontagiosas, apresentam: i) “risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices”; e ii) “riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada”. Conforme essa norma, o resíduo é considerado perigoso quando qualquer substância prevista pelo seu Anexo F extrapola os limites previstos das concentrações dos constituintes lixiviados, conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), o resíduo é considerado inerte quando “amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor”.

Contudo, Townsend, Jang e Thurn (1999) observou que os RCD foram classificados como não inertes (Classe II-A) ao serem ensaiados de acordo com procedimentos da *Test Methods for Evaluating Solid Waste* (USEPA, 1986). O mesmo resultado foi observado por outros autores: Ramos (2007), ao ensaiar RCD-R utilizando a NBR 10004 (ABNT, 2004); Barbudo *et al.* (2012), ao caracterizar RCD-R seguindo as especificações da *EU Landfill Directive*; Lima e Cabral (2013), ao ensaiar RCD-R empregando a NBR 10004 (ABNT, 2004); e Vieira e Pereira (2015a), ao caracterizar RCD-R de acordo com as orientações da *Europe Council Decision 2003/33/EC* (2003), entre outros. Diante disso, vale ressaltar que a classificação (inerte ou não inerte) e uso dos RCD/RCD-R merece uma análise detalhada das normativas empregadas para caracterização desses materiais e dos eventuais impactos gerados por tal emprego.

### **2.1.2 RCD-R produzidos na região metropolitana de Goiânia-GO**

Na região metropolitana de Goiânia-GO, há apenas uma usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) instalada na cidade de Aparecida de Goiânia-GO. O RCD recebido é inicialmente separado em 2 (dois) grandes grupos de materiais classificados visualmente: i) sem materiais argilosos presentes e ii) com materiais argilosos presentes. Esses grupos então passam por um processo de triagem manual, separando os resíduos de acordo com as classes definidas pela Resolução 307 (CONAMA, 2002). Segundo os gerentes da usina, os resíduos de Classe D são usualmente triados nos canteiros de obra e, assim, não são destinados para a usina. Os resíduos de Classe C que chegam à usina são separados e destinados aos aterros sanitários; os resíduos de Classe B são destinados a outras usinas de reciclagem; enquanto os resíduos de Classe A são agrupados em pilhas numa área de estocagem para serem britados futuramente.

Segundo Fleury, Neto e Santos (2017), a usina produz 6 (seis) tipos de materiais diferentes: i) rachão, ii) brita 1, iii) brita 0, iv) areia cinza (sem argila), v) areia marrom (com argila), e vi) pó de entulho. De acordo com os autores, a usina também produz e comercializa os seguintes materiais: i) brita graduada simples (BGS) grossa, o qual é composto por uma mistura de rachão (25%), brita 1 (25%), brita 0 (25%) e areia (25%); e ii) BGS fino, produzido com brita 1 (33%), brita 0 (33%) e areia (33%).

## **2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS RCD-R**

Quanto à caracterização da distribuição granulométrica, os estudos de Santos (2007 e 2011) revelaram que os RCD-R coletados em uma usina de beneficiamento apresentaram variabilidades aceitáveis para fins geotécnicos, possibilitando a aplicação desses materiais em ESR. Os RCD-R ensaiados foram classificados como pedregulho arenoso (Santos, 2007) e como areia pedregulhosa (Santos, 2011). As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram as curvas granulométricas encontradas nos trabalhos de Santos (2007) e Santos (2011), respectivamente.

Figura 2.1 – Curvas granulométricas do RCD-R em São Carlos-SP (Santos, 2007).

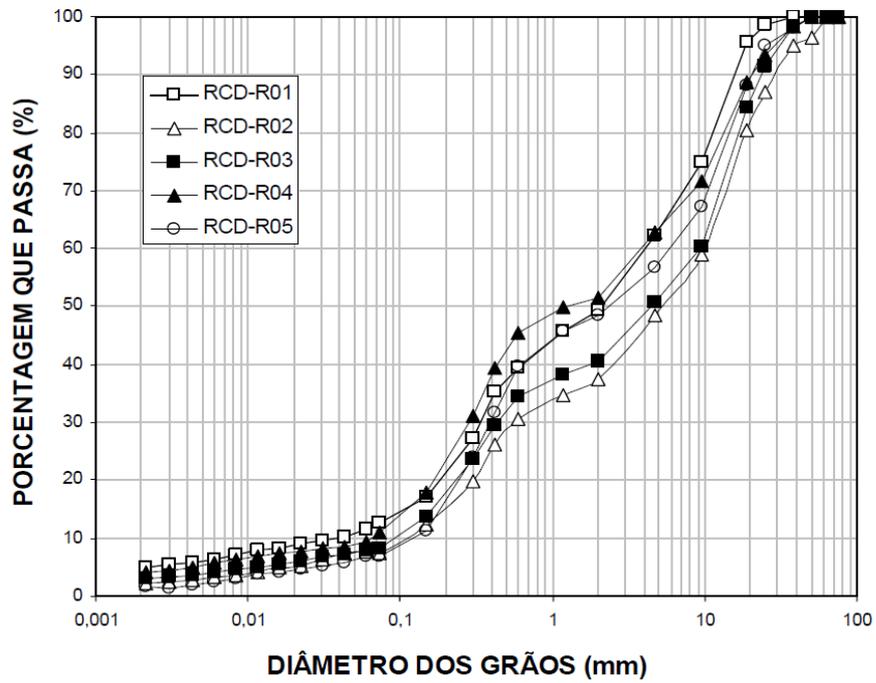
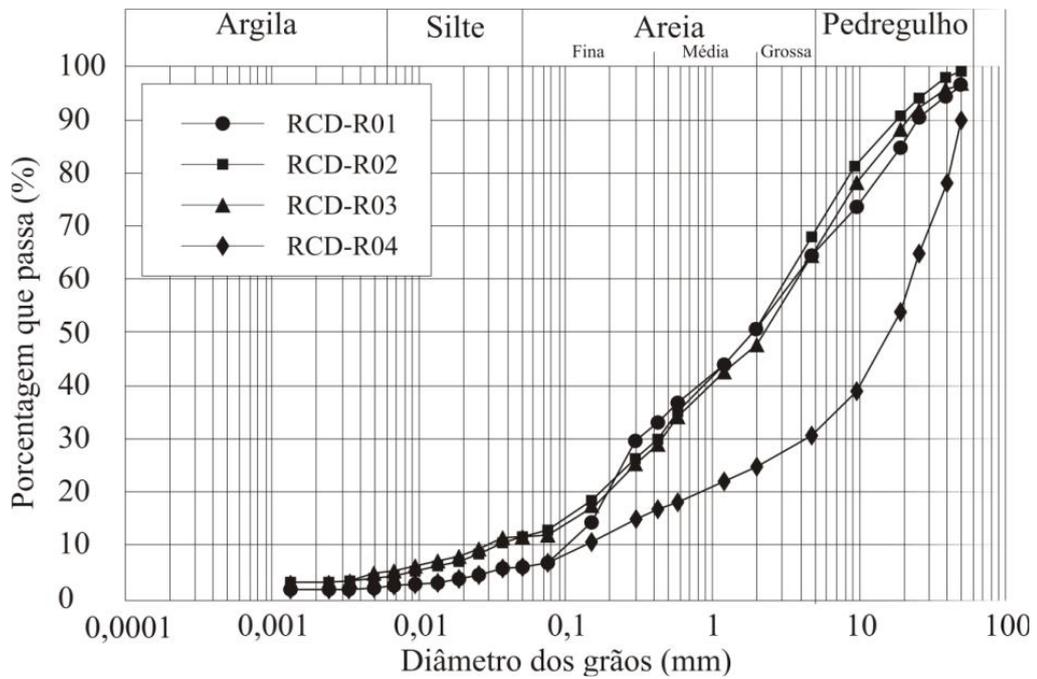
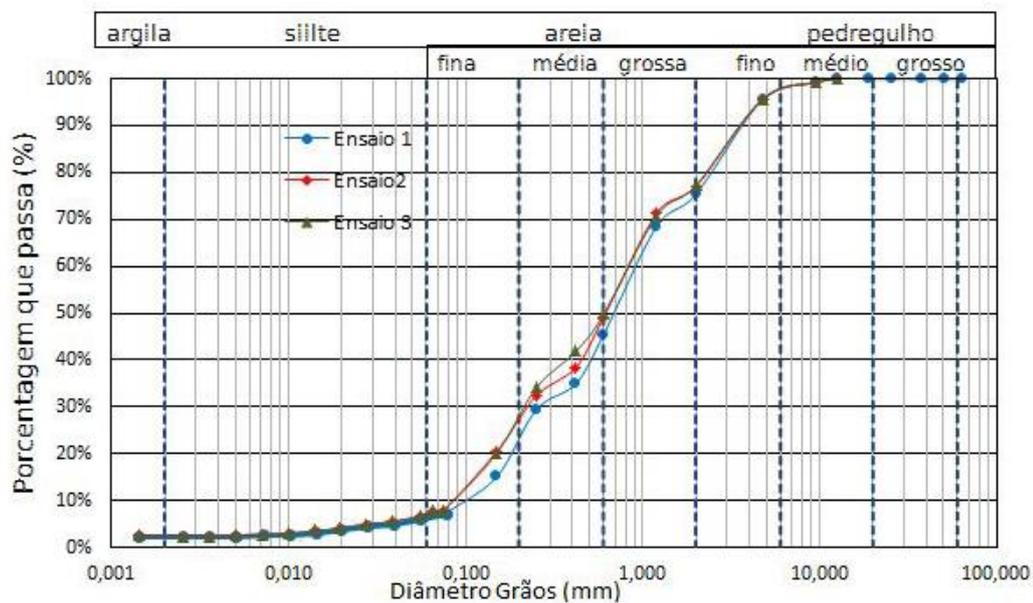


Figura 2.2 – Curvas granulométricas do RCD-R em Brasília-DF (Santos, 2011). Nota: a amostra RCD-04 foi coletada num canteiro de obra que produzia RCD-R.



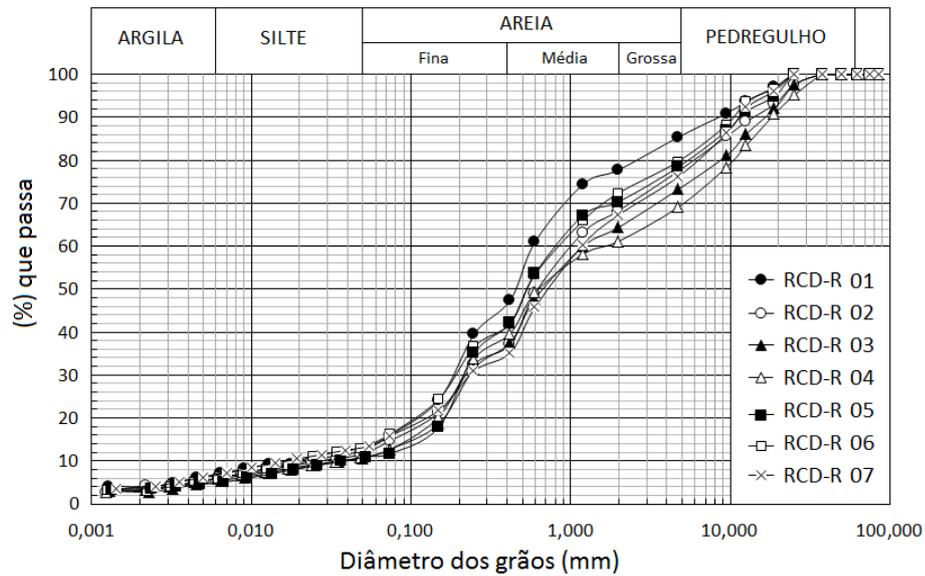
Araújo Neto (2017) analisou o comportamento de geogrelhas em ensaios de arrancamento em equipamento de pequenas dimensões utilizando o RCD-R (areia reciclada) como material de preenchimento. Durante a fase de caracterização, o autor realizou a caracterização geotécnica de amostras i) de RCD-R e ii) de uma areia grossa, para fins comparativos. Ao realizar os resultados dos ensaios de granulometria, o autor classificou o RCD-R como uma areia bem graduada com pouco pedregulho e com poucos finos. A curva granulométrica revelou uma variabilidade muito pequena para o RCD-R (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Curva granulométrica do RCD-R em Recife-PE (Araújo Neto, 2017).



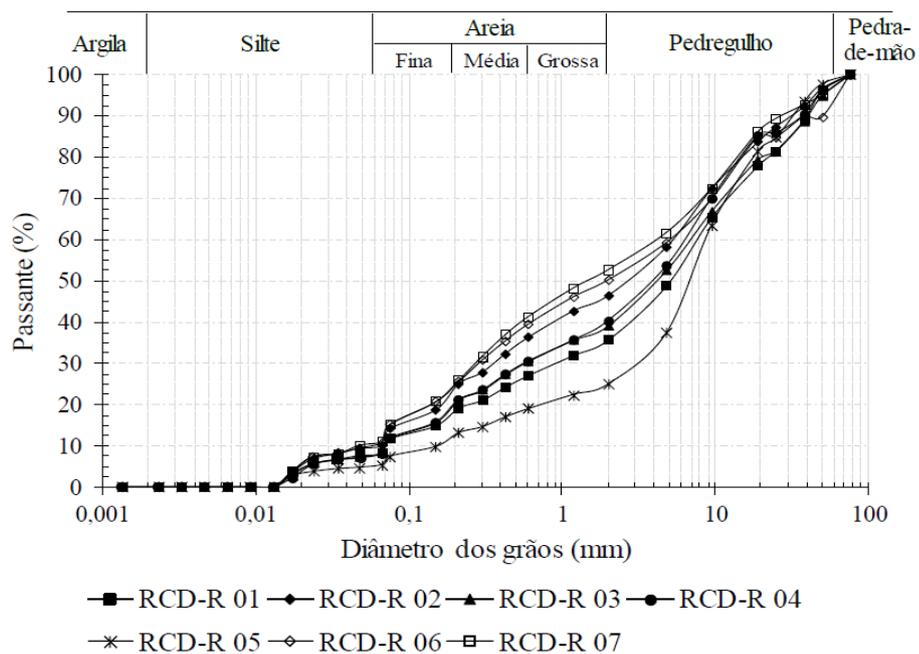
Barbosa (2017), em seu estudo sobre a degradação de geogrelhas em estradas não pavimentadas executadas com RCD-R, verificou que o ‘RCD-R misto’ era composto predominantemente por solos, com menores participações de fragmentos de concreto, cerâmicas e rochas. A autora classificou o RCD-R como uma areia com pedregulho, com uma baixa variabilidade da classificação granulométrica do RCD-R. A Figura 2.4 apresenta as curvas granulométricas obtida pela autora.

Figura 2.4 – Curva granulométrica do RCD-R em Camaragibe-PE (Barbosa, 2017).



Fleury (2018), ao estudar os danos mecânicos decorrentes dos processos de instalação de geogrelhas em campo, caracterizou 7 amostras de BGS (grossa). O autor não classificou a variabilidade apresentada pelo material, mas observou que os coeficientes de variação que possuíram maiores valores foram da ordem de 15% a 20% e se apresentaram entre as dimensões de 0,02 mm a 2,00 mm. A Figura 2.5 apresenta as curvas encontradas pelo autor.

Figura 2.5 – Curva granulométrica do RCD-R da região metropolitana de Goiânia-GO (Fleury, 2018).



Assim como as curvas granulométricas, os autores citados acima apresentam valores de massa específica dos sólidos dos RCD-R estudados. A Tabela 2.1 sintetiza os resultados encontrados por esses autores.

Tabela 2.1 – Valores de massa específica dos sólidos de RCD-R. (Próprio autor).

Autor(es)	Quantidade de amostras	Valor médio de massa específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Fleury (2018)	7	2,697	0,16	0,63
Araújo Neto (2017)	3	2,465	0,02	0,69
Barbosa (2017)	7	2,641	0,10	3,35
Santos (2007)	5	2,819	0,09	3,06

Nota-se que os valores de massa específica dos sólidos dos RCD-R variaram de 2,465 g/cm<sup>3</sup> a 2,819 g/cm<sup>3</sup>. Vale ressaltar que o tipo de RCD-R escolhido em cada pesquisa, conjuntamente com a sua composição gravimétrica, pode influenciar consideravelmente nos valores de massa específica dos sólidos. Nesse contexto, observa-se que tais valores estão dentro dos obtidos por Cardoso (2010), ao analisar a massa específica dos grãos (passantes na peneira 2,0 mm) de solos (17 amostras) do mapa pedológico de Goiânia-GO, cujos os valores variaram de 2,70 a 2,95 g/cm<sup>3</sup>.

Várias pesquisas verificaram que os RCD-R apresentaram comportamento não plástico (Santos, 2007; Araújo Neto, 2017; Barbosa, 2017 e Fleury, 2018). Para o uso como material de preenchimento em ESR, considerando as normas internacionais – BS 8006 (2010) e FHWA (2009a) –, esse fato é um ponto positivo para os RCD-R, uma vez que tal material não deve apresentar parcela de resistência coesiva.

Santos (2011) realizou ensaios expeditos para classificação MCT e verificou que a fração passante na peneira de 0,42 mm apresentou um comportamento laterítico. O autor afirma que a fração mais fina do RCD-R pode ser fortemente influenciada pelas características do solo da região de produção/beneficiamento, uma vez que a usina pode receber uma parcela significativa de solo escavado. As amostras foram classificadas quanto a sua plasticidade como amostras não plásticas ou com plasticidade média.

Observa-se a dificuldade de realizar um ensaio de compactação com RCD-R, uma vez que o material pode ter características bem distintas de granulometria e composição, o que atrapalha a realização do ensaio. Santos (2011) verificou uma grande dificuldade de moldar o segundo ponto a partir da umidade ótima, pois o material apresentou-se muito úmido e com pouca trabalhabilidade. O autor atribuiu esse comportamento ao fato de não ter aguardado o período de cura de 24 horas do material. Por esse motivo, recomendou que em obras que utilizem o RCD-R, seja feito o umedecimento prévio do material, se possível com 24 horas antes da compactação, e que adote umidades abaixo da umidade ótima.

A Tabela 2.2 apresenta os valores de peso específico seco máximo ( $\rho_{d\text{máx}}$ ) e umidade ótima ( $w_{ot}$ ) encontrados pelos autores citados anteriormente.

Tabela 2.2 – Valores de  $\rho_{d\text{máx}}$  e  $w_{ot}$  de alguns RCD-R. (Próprio autor).

Autor	$\rho_{d\text{máx}}$ (g/cm <sup>3</sup> ) médio	Coefficiente de variação ( $\rho_{d\text{máx}}$ ) (%)	$w_{ot}$ (%) médio	Coefficiente de variação ( $w_{ot}$ ) (%)
Santos (2007)	1,844	2,10	14,9	13,30
Santos (2011)*	1,930	6,40	13,7	18,20
Araújo Neto (2017)	1,761	0,50	15,53	1,70
Barbosa (2017)	1,855	1,39	12,62	6,09
Fleury (2018)	1,811	2,30	14,6	8,41

Nota: (\*) O autor não esperou 24 horas de tempo de umedecimento do material.

## 2.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS RCD-R

### 2.3.1 Comportamento do potencial hidrogeniônico (pH) do RCD e/ou RCD-R

Lima e Cabral (2013) realizaram ensaios de lixiviado e solubilizado de acordo com as normas NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), respectivamente, e obtiveram pH com o valor médio de 6,62 para o extrato lixiviado (onde os autores utilizaram uma solução simulando chuva ácida durante o processo de lixiviação), e 9,45 para o extrato solubilizado – realizado utilizando água destilada de acordo com a norma NBR 10006 (ABNT, 2004).

Vieira, Pereira e Lopes (2016) obtiveram um valor médio de pH igual a 8,2 para um RCD-R composto por 10,8% de solo e 87,3% de materiais como concreto, rochas, agregados naturais, alvenarias cerâmicas e silicato de cálcio. Santos, Palmeira e Bathurst (2013, 2014), ao avaliarem RCD-R beneficiados em usina de reciclagem, verificaram um pH (em água destilada) alcalino de valor 8,9. Arulrajah *et al.* (2013), observaram valores de pH acima de 7, ao estudar as propriedades dos RCD-R no uso sub-bases de pavimentos, compostos por resíduos reciclados de agregados de concretos, tijolos triturados, resíduos de rochas, resíduos de pavimentos asfálticos recuperados, e resíduos finos reciclados de vidro.

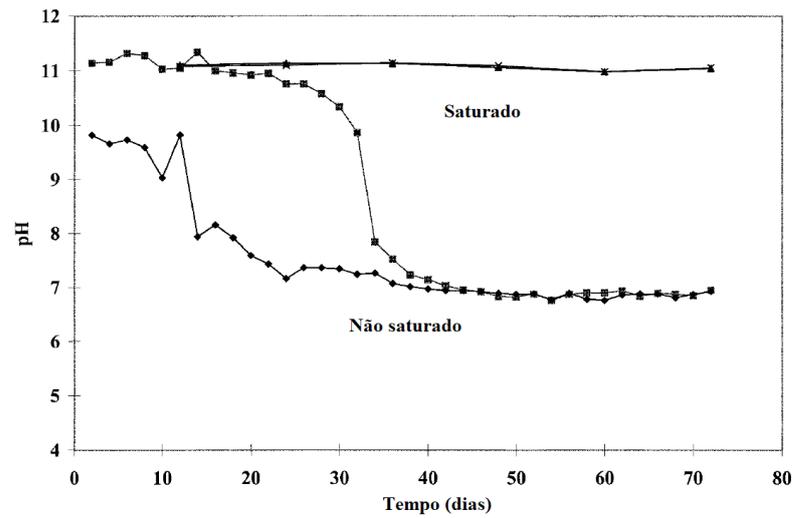
Towsend, Jang e Thurn (1999) analisaram o RCD, ao longo do tempo, em experimentos sob lixiviação em diferentes condições de saturação, sendo elas: i) condição saturada; ii) não saturado; e, iii) em condições que iniciavam saturadas e, após alguns dias, tornavam-se não saturadas propositalmente (em torno dos 30 dias do início do experimento). Os autores realizaram duas investigações: i) uma das características do lixiviado sob condições saturadas e não saturadas de um RCD misto e considerando água deionizada para a lixiviação do resíduo; e, ii) outra das características do lixiviado sob condições não saturadas de componentes separados do mesmo RCD em 6 (seis) amostras, sendo elas: i) 100% papelão; ii) 100% concreto; iii) 100% madeira; iv) 100% gesso; v) 100% gesso (amostra duplicada); e, vi) 25% papelão, 25% concreto, 25% madeira e 25% gesso. Para esta segunda condição, a lixiviação foi realizada sob uma solução para simulação de chuva, seguindo os procedimentos descritos pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) SW – 846 *Test Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure* de 1986. A primeira parte do experimento durou um período de 72 dias, e a segunda parte do experimento durou um período de 92 dias.

Towsend, Jang e Thurn (1999) notaram no primeiro experimento que, quando o experimento foi iniciado na condição saturada e passou para a condição não saturada, ao atingir o pH em condições neutras, as mudanças de pH foram acompanhadas de mudanças de características físicas da água – coloração do lixiviado mudou de claro amarelada para uma preta turva, e notou-se também um forte odor característico de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S).

Os autores observaram que: i) os ensaios sempre iniciavam com valores de pH acima de 9; ii) os ensaios saturados mantiveram valores constantes com pH e em torno de 11; e, iii) os ensaios não saturados mostrando uma queda até a estabilização, com valores de pH em torno

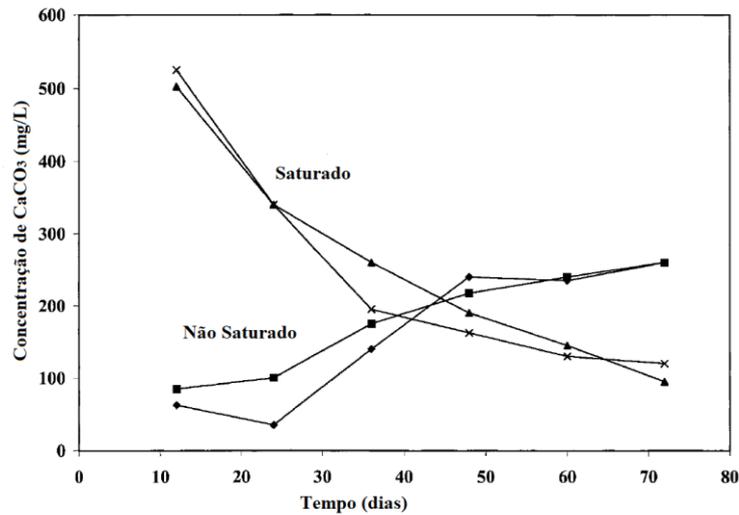
de 7. Por outro lado, os ensaios que foram iniciados saturados e seguiram para um estado não saturados apresentaram uma queda brusca nos valores de pH até a estabilização dos valores em torno de 7. A Figura 2.6 ilustra esses resultados obtidos por Townsend, Jang e Thurn (1999).

Figura 2.6 – Relação entre o pH e o tempo do experimento nas condições saturadas e não saturadas – modificado pelo autor (Townsend, Jang e Thurn, 1999).



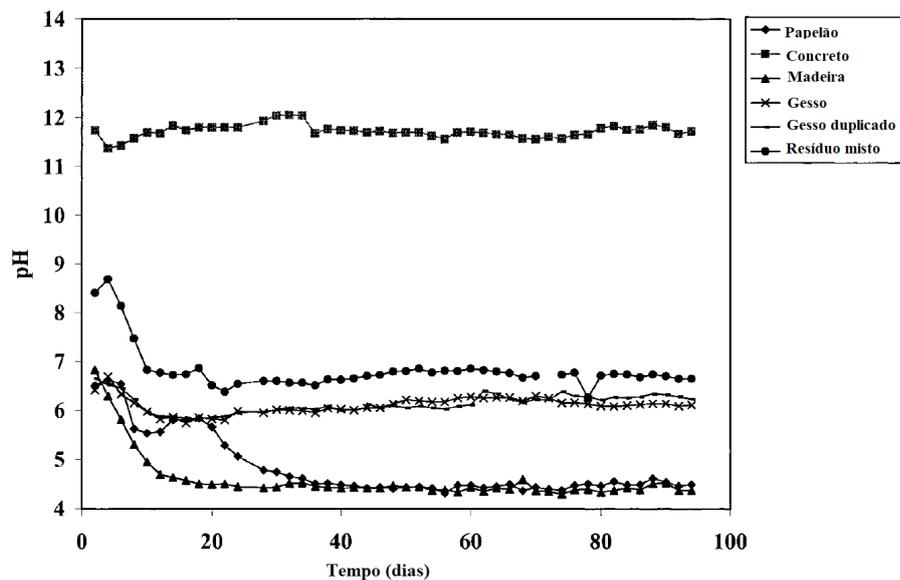
Townsend, Jang e Thurn (1999) avaliaram a alcalinidade – *Standard Methods* de 1995 (*Standard Method 2320B*) – observando os níveis de concentração de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) – relação inversa ao pH – no experimento. Nas condições saturadas, essa concentração apresentou-se inicialmente alta e diminuiu com o passar do tempo; enquanto que, nas condições não saturadas, a carbonatação dos materiais cimentícios aumentou a concentração de  $\text{CaCO}_3$  com o passar do tempo. Os autores justificaram que as maiores concentrações de  $\text{CaCO}_3$  reduzem o pH do meio. A Figura 2.7 ilustra a relação entre a concentração de  $\text{CaCO}_3$  e o tempo de duração do experimento obtida pelos autores.

Figura 2.7 – Relação entre a concentração de  $\text{CaCO}_3$  e o tempo, no lixiviado do RCD – modificado pelo autor (Towsend, Jang e Thurn, 1999).



Towsend, Jang e Thurn (1999) chegaram aos seguintes resultados relativos ao segundo experimento (materiais separados do RCD): i) o pH do concreto variou na faixa entre 11 e 12; ii) o pH do gesso variou o valor de pH em torno de 6 a 7; iii) o pH do papelão e a madeira variaram entre 4 a 7, considerando que, para ambos, houve uma queda do pH estabilizando próximo a pH 4, próximo dos 40 dias de experimentação. A Figura 2.8 ilustra os resultados dessa variação de pH encontrados pelos autores.

Figura 2.8 – Variação de pH para componentes do RCD ao longo do tempo – modificado pelo autor (Towsend, Jang e Thurn, 1999).



Lima e Cabral (2013) e Townsend, Jang e Thurn (1999) concluíram que os RCD, quando sujeitos à uma condição de campo, sofrem com lixiviação por chuvas ácidas e, portanto, soluções de água destilada ou deionizada, comumente utilizadas em laboratórios para essas análises, podem não ser o mais representativo do que ocorre no campo. Schaefer, Rocha e Cheriaf (2007) que estudaram a lixiviação de argamassas com RCD-R atentam que existem valores limites diferentes para as diferentes normas ao redor do mundo, evidenciando que o RCD-R estudado poderia lixiviar metais pesados acima do limite permitido, caso esse fosse classificado por uma norma mais rígida, como, por exemplo, a diretiva europeia 98/93/EC – *The quality of water intended for human consumption*.

Jang e Townsend (2001) estudaram o lixiviado de sulfatos da parcela fina de RCD-R da Flórida (72,6% da composição desse RCD-R é menor que 6,4 mm e os outros 27,4% maior que 6,4 mm). Os autores verificaram que os materiais passantes na peneira de abertura 6,4 mm permaneceram com um pH entre 6 e 7 após o passar do tempo nos testes de lixiviação, enquanto que as amostras não peneiradas apresentaram pH de aproximadamente 11. Os autores concluíram que, os materiais provenientes de concretos deveriam permanecer na parcela mais grosseira (partículas maiores que 6,4 mm) desses resíduos.

Em experimentos de campo, uma atenção deve ser dada à água da chuva, dado que suas características podem afetar significativamente os resultados obtidos. Coelho *et al.* (2005) avaliou o pH das chuvas do município de Goiânia-GO em 2 pontos distintos, por um período de 4 meses, entre 16 de novembro de 2003 e 16 de março de 2004. Os autores verificaram que no ponto 1 (próximo à canteiros de obra) o pH das chuvas variou de 6,08 a 7,30, obtendo um valor médio de 6,61; enquanto no ponto 2 (dentro de um parque da cidade) o pH variou de 5,77 a 7,01, com um valor médio de 6,54. Os autores avaliaram que os valores de pH das chuvas podem sofrer variações devido ao horário medido, a influência do local, como construções de edifícios (ponto 1), que pode ter contribuído com um pH menos ácido devido à suspensão de cátions como o cálcio advindo das obras, a interação entre os relevos e as estruturas construídas da cidade, e a atmosfera e o grau de incidência de chuvas que podem permitir a concentração de poluentes na atmosfera.

### 2.3.2 Composição dos RCD-R

Diversos estudos classificam a composição dos resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) fazendo a separação dos seus materiais constituintes (Cochran *et al.*, 2007; Vieira e Pereira, 2015a; Vieira, Pereira e Lopes, 2016; Santos, Palmeiras e Bathurst, 2013). É notável que uma grande quantidade de tipos de materiais pode fazer parte desses resíduos. Vieira e Pereira (2015b) afirmam que esses resíduos podem ser caracterizados por algumas classes, tais como: i) concretos, tijolos, telhas e cerâmicas; ii) madeira, vidro e plástico; iii) betumes e espécies de alcatrão de carvão, solos (incluindo solos contaminados de sítios contaminados), pedras e sedimentos advindos de processos de dragagem – materiais são classificados dessa forma conforme a norma europeia (*Commission Decision, 2000/532/EC*) –; iv) materiais isolantes e materiais de construção contendo amianto; e v) materiais constituídos de gesso; e vi) outros RCD. Cochran *et al.* (2007) estimou que os RCD produzidos na Flórida nos anos 2000 são constituídos principalmente de concreto e madeira.

O estudo de Santos, Palmeira e Bathurst (2013) verificou a composição de RCD-R, classificando-o em 15% como partículas de concreto triturado e 65% partículas de solo – ressaltando que os autores consideraram o material passante na peneira de 4,8 mm como solo. Angulo *et al.* (2009) estudaram as características químicas e mineralógicas dos RCD-R coletados em duas usinas localizadas na região de São Paulo, Brasil. Os autores verificaram que aproximadamente 50% de suas amostras passavam na peneira de 4,8 mm. Os autores concluíram que o tamanho das partículas influenciou a composição química mais que a origem do resíduo ou a classificação em ‘cinza’ (concreto) ou ‘vermelho’ (cerâmica/solo).

Ulsen *et al.* (2010) estudaram a composição química de RCD-R de duas usinas da região de São Paulo-SP (usina de Itaquera, na zona leste da cidade; e usina de Vinhedo, localizada a 100 km da cidade de São Paulo-SP). Os autores realizaram as análises químicas utilizando o ensaio de fluorescência de raios X (FRX) e perda ao fogo. No estudo, foi observado que o principal óxido dos agregados de RCD foi o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), com teores entre 48 e 84%, sendo sua origem ligada aos agregados naturais do concreto e das argamassas presentes no RCD. Verificou-se também a existência de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sendo ligada à presença de cerâmica vermelha e solo, e, secundariamente, à presença de feldspatos e cimento; óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), o que pode ser explicado pela composição dos aglomerantes do cimento (pasta de cimento endurecida, cal, gesso e outros).

Barbudo *et al.* (2012) estudaram a correlação da lixiviação de sulfatos nos agregados reciclados de RCD. Os autores realizaram ensaios em 19 amostras de RCD-R variando suas composições em quantitativos de gesso, concreto, cerâmicas, concretos e argamassas, betume, agregados naturais e outros. Os autores verificaram que os resíduos foram classificados, segundo a norma europeia (*EU Landfill Directive*), como materiais inertes ou não perigosos, e nunca como perigosos, tanto em relação às análises pelas concentrações de metais pesados ou pela concentração de sulfatos.

Vale ressaltar que a concentração de sulfatos, no estudo de Barbudo *et al.* (2012), foi o fator mais responsável pela maior parte da classificação das amostras testadas como não perigosas. Os autores também verificaram que a determinação utilizada era menos restritiva para os metais pesados do que para o sulfato, e que cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) não foram liberados na solução aquosa por nenhum material, natural ou reciclado. É possível verificar também, que o cromo (Cr) foi o único metal pesado que ultrapassou o limite da consideração de resíduo inerte em 10 amostras; no entanto, os autores não justificaram esse fato.

### 2.3.2.1 Concretos e argamassas

Existe uma série de estudos realizados acerca da carbonatação em concretos e argamassas produzidos com agregados de RCD-R (Glass, Page e Short ;1991, Nishikawa, Suzuki e Ito ;1992, Peter, Muntean e Böhm ;2008, e Visser ;2014). No entanto, isso não é observado quando a abordagem é a compreensão da carbonatação desses agregados reciclados quando expostos ao tempo. Pesquisas como a de Townsend, Jang e Thurn (1999) e Jang e Townsend (2001) mostraram que o pH alcalino dos RCD e dos RCD-R estão principalmente ligados à presença de partículas de concretos e argamassas. Townsend, Jang e Thurn (1999) discutiram que a alcalinidade (*Standard Methods – 2320B/1995*) está ligada à concentração de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presente no material analisado.

Glass, Page e Short (1991) estudaram os fatores que influenciam a corrosão do aço em argamassas carbonatadas ao realizar seus ensaios variando a umidade entre 63% e 79% - os autores justificaram que essa faixa atendia à umidade necessária para melhor acelerar a carbonatação nas argamassas. Os autores também consideraram a composição e termos de óxidos do cimento Portland de: 64,5% de óxido de cálcio (CaO); 20% de dióxido de silício

(SiO<sub>2</sub>); 5,3% de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); 3,4% de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); 3% de óxido sulfúrico (SO<sub>3</sub>); 1,2% de óxido de magnésio (MgO); 0,78% de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O); e 0,10% de óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O); além de 0,9% de perda ao fogo. Peter, Muntean e Böhm (2008) e Visser (2014) estudaram, respectivamente, a sinergia das várias reações ocorridas durante o processo de carbonatação no concreto e a influência da concentração de dióxido de carbono na resistência à carbonatação do concreto. Ambos os trabalhos apresentam como as reações de carbonatação ocorrem nos concretos, onde a reação principal é a transformação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) em carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>).

Peter, Muntean e Böhm (2008) afirmam que a carbonatação não ocorre em ambientes altamente alcalinos (pH próximo de 13). Num outro estudo, Visser (2014) mostrou que com pH igual a 12,6 o concreto não carbonatou; e que, com a diminuição do pH, a carbonatação ocorreu; até que em valores de pH menores que 10, o concreto encontrava-se completamente carbonatado. O autor também afirmou que não houve mais fase estável de hidrato de silicato de cálcio (CSH) com pH abaixo de 10. Visser (2014) concluiu que altas concentrações de CO<sub>2</sub> não alteram as reações de carbonatação, apenas aceleram essas reações.

Nishikawa, Suzuki e Ito (1992) estudaram a decomposição por carbonatação de etringita (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O) sintetizada. Os autores concluíram que a etringita carbonatou por mecanismos diferentes sob condições secas ou molhadas. Os autores conseguiram identificar, em condições secas, a presença de gesso, carbonato de cálcio e etringita em porções menores; e, em condições molhadas, concluíram que houve a decomposição da etringita em gesso, carbonato de cálcio e alumínio gel, verificados por difratometria de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Liu *et al.* (2018) estudaram o efeito da carbonatação no concreto pelo ataque físico de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Os autores concluíram que o mecanismo de dano no concreto pela carbonatação na presença de sulfato mudou de ataque químico para ataque físico (cristalização de sais na zona de evaporação de elementos do concreto). Os autores avaliaram que a carbonatação, que era favorecida por i) altos fatores água e cimento (A/C), ii) a incorporação de misturas minerais, iii) a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera do local e iv) o consumo de Ca(OH)<sub>2</sub> pelo ataque químico, poderia ter o tempo de transição de ataque químico para o ataque físico encurtado em função de todos esses fatores.

### 2.3.2.2 Cerâmicas

Barbudo *et al.* (2012) observaram que RCD-R com mais de 30% de partículas cerâmicas ou com mais de 2% de gesso apresentaram alta solubilidade de conteúdos de sulfato. Outros exemplos de trabalhos que estudaram as cerâmicas são Rambaldi *et al.* (2007), que avaliaram a reutilização de pó de grés porcelânico (porcelanato) na produção revestimentos, e Bernardin, Silva e Riella (2006), que investigaram a caracterização de cerâmica celular feita por resíduos de porcelanato. Nesses dois estudos, a caracterização das cerâmicas foi realizada por meio de ensaios de FRX, o que revelou que os materiais eram principalmente formados por  $\text{SiO}_2$  (59 – 64%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (aproximadamente 17%), e por meio de análises mineralógicas através de DRX, o que mostrou a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e de zirconita ( $\text{ZrSiO}_4$ ).

Pacheco-Torgal e Jalali (2010) estudaram o reuso de resíduos cerâmicos em concreto e, para isso, os autores consideraram cerâmicas brancas e vermelhas e realizaram caracterização em alguns tipos de cerâmicas. Os ensaios de FRX apresentaram-se de acordo com os resultados citados anteriormente, dado que foram encontrados principalmente  $\text{SiO}_2$  (51 – 66%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (18 – 22%) na composição das cerâmicas. Os ensaios de DRX evidenciaram as maiores frequências de quartzo, moscovita, ilita, feldspato e anortoclase. Ulsen *et al.* (2010) concluíram que o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no RCD-R foi significativamente influenciado pelo teor de cerâmica vermelha e pela contaminação do solo na fração menor que 0,15 mm.

### 2.3.2.3 Gesso

Asakura *et al.* (2009) estudaram as características do RCD-R produzidos no Japão e métodos para separar o gesso e a madeira desses resíduos. Os autores observaram que os valores médios de gesso permaneciam em torno de 2%, e que as amostras que apresentavam mais de 2% de gesso haviam sido contaminadas por placas de gesso, no entanto, ressaltaram que as placas de gesso poderiam ser separadas manualmente. Os autores também concluíram que o material processado a partir de obras de demolição possuía mais gesso do que o material que havia sido processado de construções, e também que o gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e carbono orgânico dissolvido (COD) tendem a estar presentes nas partículas menores, enquanto que a madeira nas partículas maiores. Os autores verificaram concentrações acima do limite permitido para o cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ), Pb e fluoreto e seus componentes, o que pode ser explicado pela presença de metais pesados de tintas em madeiras. Contudo, os autores fizeram

ressalvas que estas conclusões necessitavam de maiores análises e sugeriram maior atenção a esses componentes encontrados acima dos limites permitidos.

Asakura (2015) estudou o sulfato e a concentração de matéria orgânica na relação com a geração do sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) em aterros de resíduos sólidos inertes do Japão. Townsend, Jang e Thurn (1999), que notaram um forte odor em seus experimentos, atribuíram esse fato ao surgimento de sulfato de hidrogênio ( $H_2S$ ). Lee *et al.* (2006) estudaram os componentes reduzidos de enxofre nos gases produzidos em aterros de RCD e, avaliando 10 aterros de resíduos nos Estados Unidos, confirmaram a liberação de  $H_2S$  nesse tipo de resíduo. Xu e Townsend (2014) que estudaram os fatores que afetam a emissão de  $H_2S$  em aterros de RCD, confirmaram também que os gases emitidos em aterros de RCD são devidos a compostos reduzidos de enxofre, e que os mais comuns em aterros são sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), disulfeto de carbono ( $CS_2$ ) e dimetil sulfeto ( $CH_3-SCH_3$ ). Hu, Du e Long (2017) e Townsend, Jang e Thurn (1999) explicaram que o mal cheiro deve-se a bioconversão do sulfato presente no gesso para  $H_2S$  e a presença de materiais como papel, papelão, madeira, resíduo vegetal que favorecem a existência de bactérias capazes de realizar tal processo em ambientes não saturados.

Lee *et al.* (2006) e Xu e Townsend (2014) concluíram que as concentrações de  $H_2S$  nos vapores do solo resulta: i) da heterogeneidade dos resíduos e dos solos, ii) do impacto das condições climáticas, e iii) das práticas de gerenciamento de cada local. Os autores completam suas conclusões afirmando que grandes emissões de  $H_2S$  podem não causar problemas com odores devido à dispersão atmosférica.

Jang e Townsend (2001) comentam que o cálcio e o sulfato são as espécies iônicas primárias que contribuem no total de sólidos dissolvidos no lixiviado do RCD-R, e isso é resultado da dissolução de placas de gesso. Os autores verificaram que o limite de sulfato lixiviado foi excedido no segundo limite para a consideração de água potável, e que as concentrações de sulfato se aproximaram ou excederam a solubilidade de sulfato do gesso dissolvido. Barbudo *et al.* (2012) concluíram que o gesso é a principal fonte de sulfato nos RCD-R.

#### 2.3.2.4 Madeira

Stook *et al.* (2005) estudaram o lixiviado relativo e a toxicidade da água de madeira tratada por diversos produtos que aumentam a durabilidade da madeira. Os autores citam que a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), desde 2004, proíbe a utilização de produtos que contenham arsênio (As) ou cromo (Cr) na preservação de madeiras em usos residenciais. Os autores realizaram 84 ensaios de lixiviação e testes complementares para verificar as concentrações dos produtos lixiviados em 7 madeiras protegidas, utilizando 4 tipos diferentes de fluidos para a lixiviação.

Considerando apenas os resultados do fluido alcalino (água do mar sintética), que possuía um pH de 8,5, constatou-se que, ao proteger a madeira com trióxido de cromo ( $\text{CrO}_3$ ), óxido de cobre ( $\text{CuO}$ ) e pentóxido de arsênio ( $\text{As}_2\text{O}_5$ ), o cobre (Cu) foi o metal que mais lixiviou (aproximadamente 10 mg/L), seguido por arsênio (As) (aproximadamente 4 mg/L) e cromo (Cr) (aproximadamente 2 mg/L). Os autores atribuíram essa maior lixiviação de cobre à presença de ligantes cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e brometo ( $\text{Br}^-$ ), os quais são capazes de formar substâncias mais estáveis com o cobre e grandes concentrações de cátions divalentes. Os resultados dos ensaios realizados com as madeiras protegidas com produtos químicos livres de arsênio (As) mostraram que houve uma lixiviação da ordem de 26 – 79 mg/L de cobre (Cu), valores esses maiores do que a proteção com cromo (Cr), cobre (Cu) e arsênio (As); e os produtos que possuíam boro (B) em sua composição lixiviaram cerca de 10 a 20 mg/L.

Os autores compararam os valores encontrados com a literatura e concluíram que o arsênio (As) que lixiviou eram similares, (os autores verificaram que os valores da literatura variaram de 6 a 10%). Os autores também verificaram que os novos produtos de proteção das madeiras não lixiviaram cromo (Cr) e arsênio (As), mas, no entanto, lixiviaram em maiores quantidades o cobre (Cu). Sobre os tratamentos com boro (B), verificou-se uma grande quantidade de lixiviação desse elemento, o que limita o seu uso a ambientes onde não há chances de haver lixiviação nas madeiras, como por exemplo ambientes fechados (STOOK *et al.*, 2005). Os autores também atentam para o fato de que madeiras não tratadas também lixiviam certa toxicidade, mas, no entanto, em quantidades menores que as observadas em madeiras tratadas.

### 2.3.2.5 Solo

Mascarenha *et al.* (2018) estudaram os efeitos da adição de fosfogesso no comportamento mecânico de argila laterítica da região metropolitana de Goiânia-GO. Resultados do estudo revelaram um pH ácido com valor de 5,4 (em água destilada) para o solo estudado. Num estudo sobre estabilização de solos, Lafiti *et al.* (2017) caracterizaram um solo laterítico da Malásia e verificaram um pH de 5,35 e uma composição química, em termos de óxidos, de 25,6% de SiO<sub>2</sub>, 31,10% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 35,53% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 7,91% de CO<sub>2</sub>. Collares e Vilar (2018) caracterizaram, química e mineralogicamente, solos das cidades de São Carlos-SP e de Ribeirão Preto-SP. Os resultados revelaram que o solo de São Carlos-SP apresentou pH de 5,3 – com quartzo, caulinita e gibsita como os principais minerais – e o de Ribeirão Preto apresentou pH de 6,27 – com caulinita, gibsita, hematita e goethita como os principais minerais.

Frempong e Yanful (2007) estudaram as interações de drenagem de solos tropicais ácidos de minas de extração de ouro. Os autores fizeram análises em 3 solos (nomeados A, H e K) coletados na parte sul de Gana, oeste da África. A caracterização geotécnica indicou que esses solos possuíam de 35% a 39% de argila, superfície específica e capacidade de troca de cátions (CTC) com valores relativamente baixos para o solo A e H, refletindo na predominância de caulinita nesses dois solos. Os resultados dos ensaios de pH foram de 5,0, 4,8 e 6,7, respectivamente, para os solos A, H e K.

Lopes e Guilherme (2016) afirmam que o pH do solo do cerrado – em água destilada – possui um valor médio de 5,0 (variando na faixa de 4,3 – 6,2). Os autores observaram que o pH variou entre 5,0 e 5,9 em 50% das amostras analisadas, concluindo que somente 1,5% das amostras apresentaram pH de 6,0 ou maior, evidenciando o caráter ácido desse solo. O estudo também revelou que os valores médios de cálcio trocável foi de 0,050 g/dm<sup>3</sup> (variando na faixa de 0,008 – 1,365 g/dm<sup>3</sup>); de magnésio trocável foi de 0,011 g/dm<sup>3</sup> (variando entre 0,000 e 0,245 g/dm<sup>3</sup>); de potássio trocável foi de 0,031 g/dm<sup>3</sup> (variando entre 0,008 e 0,238 g/dm<sup>3</sup>); de alumínio trocável (Al<sup>+3</sup>) de 0,050 g/dm<sup>3</sup> (variando na faixa de 0,007 – 0,216 g/dm<sup>3</sup>); e a capacidade de troca catiônica efetiva foi de 1,1 meq/dm<sup>3</sup> (variando de 0,35 a 8,10 meq/dm<sup>3</sup>). Os autores concluíram que os solos do cerrado são altamente intemperizados, com baixa predominância de argilas de baixa atividade e grande potencial de lixiviação de cátions.

## **2.4 DEGRADAÇÃO QUÍMICA DAS GEOGRELHAS DE PET E PVA**

### **2.4.1 Características gerais das geogrelhas**

As geogrelhas são geossintéticos que possuem a função principal de reforço e, em casos especiais, podem ser utilizadas com a função de separação. Podem, segundo o processo de fabricação, ser: i) extrudadas, ii) soldadas ou iii) tecidas. A geometria desse tipo de geossintético é concebida de maneira que forme uma estrutura em forma de grelha onde as aberturas permitem uma interação com o meio onde a mesma será inserida.

Segundo Greenwood e Curson (2012), os geossintéticos possuem, usualmente, estabilizantes numa camada de proteção sobre as fibras poliméricas, de modo que tal camada sirva de barreira contra condições que possam degradar esse material. Para os autores, as fibras poliméricas dos geossintéticos são degradadas primariamente por oxidação, e é por esse motivo que elas possuem estabilizantes antioxidantes, para retardar e prevenir o efeito de oxidação. Carneiro (2009) chamou a atenção para o fato de que a oxidação pode ocorrer, inclusive, durante a fase de fabricação do polímero. Greenwood, Schroeder e Voskamp (2012) afirmaram que, para os geossintéticos constituídos de PET (susceptíveis à hidrólise), a degradação está intrinsicamente relacionada ao contato com solos úmidos, e ressaltaram que a hidrólise pode ocorrer, preferencialmente, ao redor de óxido de titânio ( $TiO_2$ ) ou trióxido de antimônio ( $Sb_2O_3$ ).

### **2.4.2 Propriedades dos polímeros utilizados nos geossintéticos e mecanismos de degradação do PET e do PVA**

Levando em consideração os polímeros que costumam constituir os geossintéticos, Greenwood, Schroeder e Voskamp (2012) analisaram a composição e as características de alguns polímeros utilizados em geossintéticos, e apresentam como principais características o seguinte:

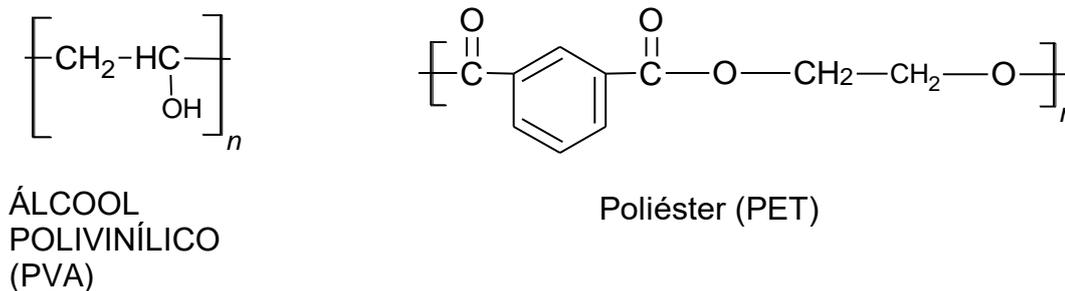
- **Poliéster (PET):** tereftalato de polietileno ou polietileno tereftalato, possui boas propriedades mecânicas e boa resistência química em meios não alcalinos. As ligações éster da cadeia polimérica são hidrolisadas lentamente na presença de água ou de

vapor de água, até a ruptura da mesma e, conseqüentemente, diminuindo o peso molecular.

- Cloreto de polivinil (PVC): pertencente ao grupo de resinas à base de vinil, é, primordialmente, um polímero rígido. No entanto, com a adição de um plastificante, é possível prover um polímero mais ou menos flexível. O PVC pode ser degradado por calor, hidrólise ou luz ultravioleta, o que o torna quebradiço e de cor escura. Vale ressaltar que a durabilidade varia amplamente de acordo com a formulação e do tipo do estabilizante.
- Poliamidas (PA): termoplástico utilizado em fios e fibras de geotêxteis. Existem tipos diferentes, nomeados ‘poliamida 6’, ‘poliamida 6.6’, etc., de acordo com monômero utilizado. Possui boas propriedades mecânicas, oferecendo uma combinação de ductibilidade, resistência ao desgaste e à abrasão, e baixo atrito. Ressalta-se que possui resistência limitada aos ácidos, à oxidação, à hidrólise e ao intemperismo e, portanto, necessita de estabilizadores adequados.
- Álcool Polivinílico (PVA): é produzido a partir da hidrólise de acetato de polivinil. O ponto de temperatura de degradação é próximo a 40 °C, e, portanto, assim como o PET e a PA, necessita que se considere a extrapolação de Arrhenius para a análise de durabilidade. Chama-se a atenção para o fato de possuir alta resistência e rigidez, e boa resistência aos álcalis, baixa concentração de ácidos e óleos.

Os polímeros são longas moléculas construídas através da adição de pequenas e repetitivas moléculas conhecidas como monômeros. De acordo com Carneiro (2009) e Greenwood, Schroeder e Voskamp (2012), o PET está mais susceptível à degradação por hidrólise, enquanto que o PVA é mais susceptível à degradação por oxidação. A Figura 2.9 mostra as fórmulas químicas do PET e do PVA.

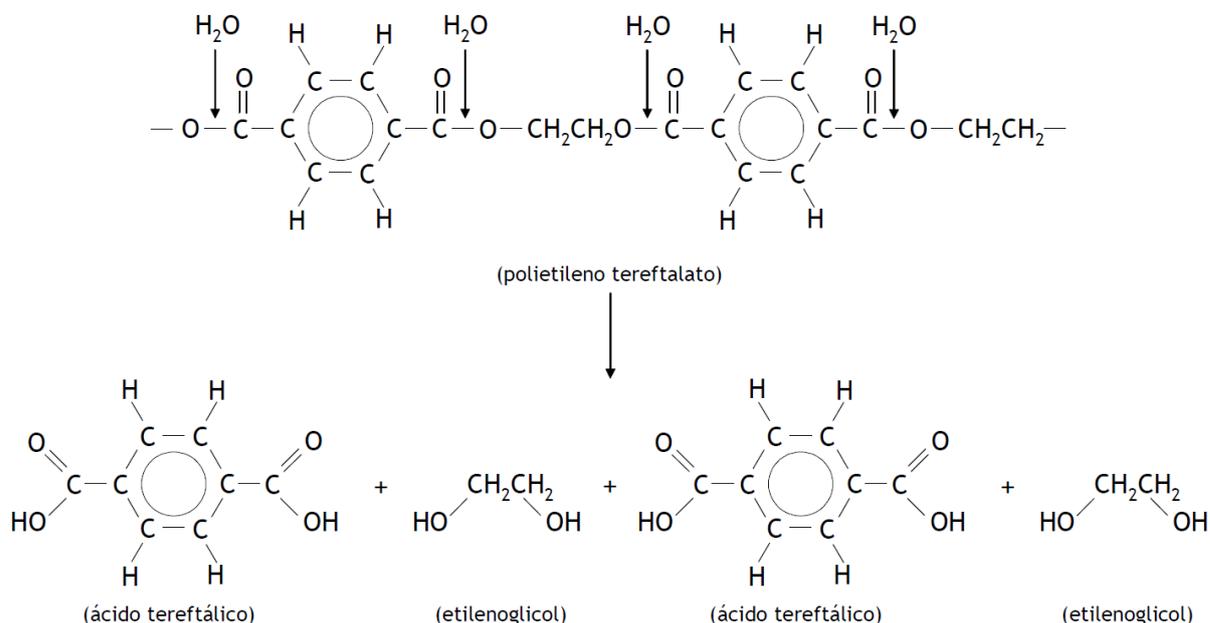
Figura 2.9 – Fórmulas químicas do álcool polivinílico (PVA) e do poliéster (PET) (Próprio autor).



Segundo Carneiro (2009), a hidrólise é um processo de degradação entre as moléculas de água e polímero que leva à ruptura das cadeias poliméricas, diminuindo sua massa molecular e provocando impactos indesejados nas propriedades mecânicas dos geossintéticos (ficam frágeis e quebradiços). Para o autor o processo da hidrólise é relativamente lento a temperatura ambiente, podendo ser acelerado com o aumento da temperatura, e a velocidade da reação é dependente da umidade (que pode ter um efeito sinérgico com outros agentes de degradação), da temperatura e do pH. Para o autor o PET é mais vulnerável em meio alcalino do que em meio ácido.

Elias, Salman e Goulias (1998) visualizaram as diferenças nos mecanismos de degradação do PET em meios ácidos, neutros e alcalinos. Os autores verificaram que em meio neutro a hidrólise ocorre de maneira muito lenta, sendo a reação inversa à reação de formação do polímero, ocorrendo quebras nas ligações ésteres e consequente redução da massa molecular. Essa reação é catalisada pela presença de grupos carboxílicos, no entanto, como a própria reação de degradação do PET produz grupos carboxílicos, considera-se que essa é uma reação auto catalítica. Em meios ácidos o mecanismo de degradação do PET tem a mesma configuração visualizada em meio neutro, ocorrendo mais rapidamente, uma vez que existem maiores concentrações de íons  $\text{H}^+$ . Em meios alcalinos, Elias, Salman e Goulias (1998) e Burgoyne e Merri (2007), comentaram que as ligações ésteres são quebradas pelo ataque de íons  $\text{OH}^-$ , resultando em ácido tereftálico e etilenoglicol. A quebra dessa cadeia resulta em redução da massa molecular e eventualmente perda de resistência da fibra polimérica do geossintético. A Figura 2.10 mostra o mecanismo de degradação do PET.

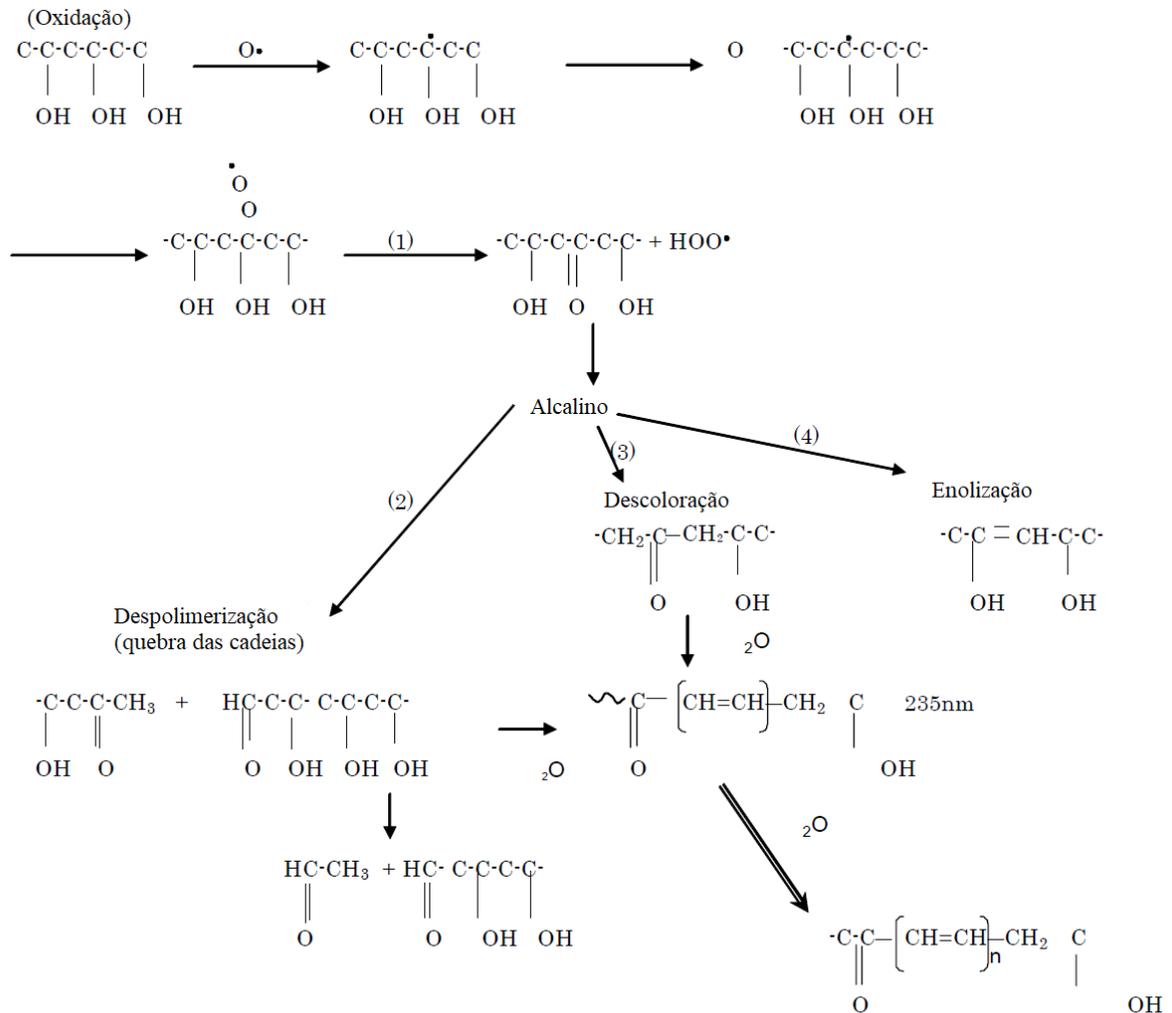
Figura 2.10 – Mecanismo de degradação do PET por hidrólise – modificado pelo autor (Carneiro, 2009).



Nishiyama, Yamamoto e Hoshiro (2006) comentaram que durante a reação de oxidação das moléculas de PVA em ambientes alcalinos, são formados grupos carboxílicos. A mudança de coloração das fibras (branco para tons amarelados) também é relacionada ao aumento da concentração de grupos carboxílicos. Os autores verificaram que a redução da resistência nas fibras de PVA foi muito sensível a quantidade de grupos carboxílicos gerados ao longo do processo de degradação da fibra desse polímero. Os autores explicaram que os grupos carbonilas são formados em meio às moléculas de PVA pela oxidação em meios alcalinos. A formação desses grupos induz a quebra das cadeias poliméricas (reduzindo a massa molecular) e/ou enolização (que não induz a quebra da cadeia). A formação dos grupos carbonilas provocam a descoloração das fibras de PVA.

A Figura 2.11 ilustra o mecanismos de degradação das fibras de PVA em meio alcalino, onde os ponto (1) é a formação do grupo carbolina; o ponto (2) a despolimerização do PVA; o ponto (3) a descoloração e grupos de radicais carboxílicos; e o ponto (4) a enolização que pode acontecer dependendo da situação. A formação dos grupos carboxílicos causa a descoloração da fibra e pode ser medido através da absorção de raios ultravioletas no comprimento de onda de 235 nm.

Figura 2.11 – Mecanismo de degradação do PVA por oxidação – modificado pelo autor (Nishiyama, Yamamoto e Hoshiro, 2006).

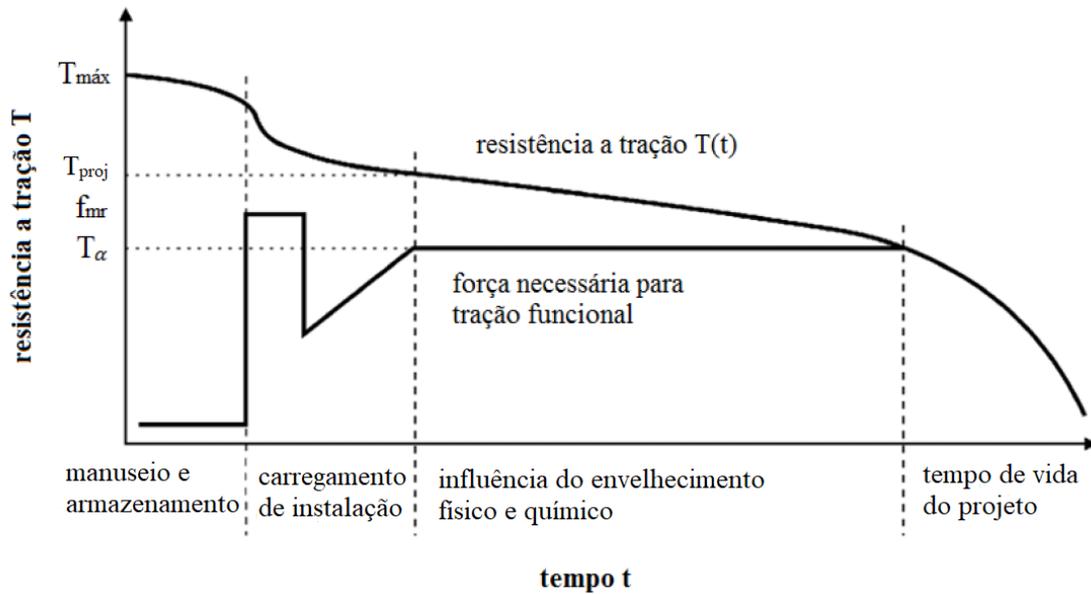


### 2.4.3 Fatores de redução

Segundo Hufenus *et al.* (2005), os efeitos a curto prazo são causados por danos durante a fase de instalação que reduz a tensão máxima admissível, no entanto, não afeta as propriedades de serviço à longo prazo que ficam sujeitas aos efeitos do envelhecimento por fatores físicos e químicos como hidrólise, oxidação e/ou abrasão. A Figura 2.12 ilustra a variação de resistência à tração do geossintético ao longo do tempo de vida estimado para o projeto ( $T_{\text{máx}}$

equivale a tensão máxima; e  $T_{proj}$  equivale a tensão de projeto após danos causados pela instalação).

Figura 2.12 – Tempo de vida versus resistência à tração – modificado pelo autor (HUFENUS *et al.* 2005).



Em estruturas de solo reforçado (ESR) para uma dada tração requerida pelo geossintético ( $T_{req}$ ), definida pelo projeto e considerando um valor de resistência à tração ( $T_{máx}$ ) fornecida pelo fabricante, adota-se um fator de redução global (FR), conforme a Equação 2.1 (VERTEMATTI, 2004):

$$FR = f_{cr} * f_{mr} * f_a * f_m \quad (2.1)$$

Onde:

FR : fator de redução global;

$f_{cr}$  : fator de redução parcial para fluência em tração ( $T_{máx}/T_{req}$ );

$f_{mr}$  : fator de redução parcial para danos mecânicos de instalação;

$f_a$  : fator de redução ambiental;

$f_m$  : fator de resistência parcial para incertezas estatísticas na determinação da resistência do geossintético.

A partir do FR pode-se determinar a resistência à tração disponível ( $T_\alpha$ ):

$$T_\alpha = \frac{T_{m\acute{a}x}}{FR} \quad (2.2)$$

Portanto, deve-se ter que:

$$T_\alpha \geq T_{req} \quad (2.3)$$

Na prática, determina-se qual o menor  $T_{m\acute{a}x}$  que atende as Equações 2.3 e 2.4:

$$T_{m\acute{a}x} \geq FR * T_{req} \quad (2.4)$$

Segundo Vertematti (2004), os fatores parciais podem ser encontrados em bibliografias específicas da área, ensaios realizados pelos fabricantes ou ensaios próprios (realização de ensaios de tração do material recebido na obra para fins de controle de qualidade) realizados. Podendo-se, também, optar por utilizar valores de fatores parciais existentes em tabelas para fase de projeto básico. No entanto, esses valores possuem uma faixa relativamente grande de variação, o que acaba por elevar os valores de FR. Por esse motivo, é importante realizar pesquisas laboratoriais e de campo para reduzir essas faixas de valores e adotar fatores de redução de resistência mais próximos da real necessidade para cada situação.

#### 2.4.4 Dano de instalação

Vários autores vêm estudando as consequências causadas por danos mecânicos de instalação de geogrelhas em estruturas de solo reforçado (ESR). Segundo Barbosa (2017), esses danos estão associados: i) ao tipo do polímero constituinte do geossintético; ii) ao tipo do material de preenchimento utilizado na estrutura; e, iii) à energia de compactação aplicada.

Hufenus *et al.* (2015) realizaram 38 testes em geogrelhas e geotêxteis a fim de investigar danos de instalação e os fatores de redução de resistência. Os autores utilizaram 3 materiais diferentes para o aterro: i) areia, ii) cascalho arredondado e iii) brita angular. As amostras foram instaladas numa base de 120 mm e, posteriormente, compactada uma camada de 230 mm de aterro com auxílio de um rolo compactador vibratório. Os autores concluíram que os danos de instalação foram influenciados diretamente pelo tipo do material de aterro e pela energia de compactação. A redução de resistência dependeu principalmente da geometria e o tipo do geossintético e, em segundo plano, do tipo do polímero que o constituiu.

Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2009) estudaram o efeito da danificação – durante a instalação – de uma geogrelha tecida em PET em seu comportamento mecânico a curto e a longo prazo. Para a realização dos testes, foram confeccionados aterros de base com pelo menos 150 mm de espessura de solo, sobre os quais foram instaladas as geogrelhas e, posteriormente, adicionadas outras duas camadas de solo com 200 mm de espessura. Foram utilizados dois tipos de solos, um com uma dimensão máxima de 50,8 mm e outro com dimensão máxima de 5 mm. Foram considerados duas energias de compactação, uma de 90% do Proctor normal e outra de 98% do Proctor normal. Os autores concluíram que o solo que possuía partículas com maiores dimensões e com maior energia de compactação causaram maiores danos de instalação à geogrelha tecida em PET.

Duvall (1994) estudou o impacto que a estrutura causa na durabilidade das geogrelhas de PET protegidas. O autor verificou, através do MEV, a existência de vazios, e avaliou que caso haja falha na proteção, a água e/ou umidade pode entrar nesses vazios expondo a estrutura a uma degradação química acelerada. Portanto, pode-se entender que danos causados durante a instalação podem provocar rasgos, furos ou desgastes na proteção das geogrelhas capazes de acelerar o processo de degradação química.

## 2.4.5 Fatores da degradação química e ambiental

Os geossintéticos estão sujeitos à ação de vários agentes de degradação, como agentes químicos (ácidos ou bases), temperaturas elevadas, oxigênio atmosférico, radiação solar e outros agentes climáticos, umidade e microrganismos. Pode-se considerar que a degradação química dos geossintéticos ao contato com RCD-R deve ocorrer em ambiente alcalino. Nesse contexto, temperatura, umidade e/ou outros fatores podem atuar como aceleradores do processo de degradação química (Carneiro, Almeida e Lopes, 2014).

Segundo Hsuan *et al.* (2008), que estudaram a performance a longo prazo e a previsão do tempo de vida de geossintéticos, e Kay, Blond e Mlyranek (2004), que estudaram a durabilidade física e química dos geossintéticos poliméricos, consideram como fatores para a degradação química dos geossintéticos os seguintes agentes: i) a ação de líquidos; ii) a temperatura; iii) o contato com o oxigênio; e, iv) a exposição à microrganismos.

### 2.4.5.1 Ação de líquidos

De acordo com Kay, Blond e Mlyranek (2004) e Hsuan *et al.* (2008), a ação de líquidos sujeitam os geossintéticos aos fenômenos de: i) absorção de líquidos, onde moléculas do líquido penetra nos materiais poliméricos aumentando a distância entre as cadeias e reduzindo a força de atração; ii) extração de aditivos, onde a extração pode ocorrer por lixiviação ou volatilização e isso ocorre quando o nível de interação entre o aditivo e o solvente extrator (água ou outra substância química) é maior que o aditivo e o polímero; e, iii) ocorrência de reações químicas nas cadeias poliméricas, das quais a hidrólise destaca-se podendo provocar até a ruptura das cadeias poliméricas, considerando que a hidrólise pode ocorrer em ambientes ácidos, neutros ou alcalinos, havendo variações nas reações de hidrólise do PET para cada um desses ambientes, sendo o PET mais susceptível à perda de suas propriedades materiais em ambientes alcalinos do que em ambientes ácidos.

### 2.4.5.2 Ação da temperatura

Segundo Kay, Blond e Mlyranek (2004) e Hsuan *et al.* (2008), a ação da temperatura pode provocar danos aos geossintéticos, seja: i) acelerando os mecanismos de degradação dos polímeros (o aumento da temperatura aumenta a velocidade das reações); ii) dissociando as

ligações químicas formando radicais livres; e iii) provocando dilatações e contrações térmicas, uma vez que a maioria dos geossintéticos são termoplásticos, e, assim estão sujeitos à dilatação com aumento da temperatura, sendo este um processo reversível. A exposição aos raios ultravioletas também é problemática e deve ser evitada, pois, a mesma pode provocar: i) descoloração; ii) aparecimento de fissuras; iii) fragilização; e, iv) modificação de suas propriedades.

Segrestin e Jailloux (1988) estudaram a temperatura dos solos e seus efeitos no envelhecimento de geossintéticos poliméricos através de modelagem numérica e registros de temperatura em casos de obras reais. Os autores afirmaram, com certeza, que a temperatura dos solos somente é constante a profundidades maiores que 10 metros, segundo os autores, contrariando ideias anteriores; e que os geossintéticos podem estar expostos a grandes variações de temperatura. Murray e Farrar (1988) estudaram a distribuição de temperatura em muros de contenção de solo reforçado. Os autores observaram dados de 7 anos de uma autoestrada e, posteriormente, buscaram realizar uma modelagem numérica através de retroanálise. Contradizendo Segrestin e Jailloux (1988), Murray e Farrar (1988), afirmaram que as temperaturas se tornam constantes a profundidades maiores que 4 metros.

#### 2.4.5.3 Contato com o oxigênio

De acordo com Kay, Blond e Mlyranek (2004) e Hsuan *et al.* (2008), o contato com o oxigênio sujeita os geossintéticos à ação de oxidação, podendo gerar falhas prematuras por alterações físicas e mecânicas dos polímeros, as quais os tornam frágeis e quebradiços. Este processo pode ser acelerado pela incidência de raios ultravioletas, aumento da temperatura, presença de cátions metálicos, umidade, fadiga mecânica, concentração de oxigênio no ambiente, entre outros. Para os autores, o processo de inibição da oxidação pode ser retardado ou inibido pela incorporação de pequenas quantidades de antioxidantes e estabilizantes na composição dos geossintéticos, em geral na ordem de 0,02% a 1%.

#### 2.4.5.4 Ação dos microrganismos

Segundo Kay, Blond e Mlynarek (2004), a ação dos microrganismos pode causar: i) metabolização de segmentos da cadeia polimérica, potencializada pela hidrólise ou oxidação enzimática e, ii) reações químicas, produzidas pelo metabolismo dos microrganismos. Para os

autores, a luz visível pode favorecer o crescimento de alguns microrganismos, mas a maioria deles são destruídos pela radiação ultravioleta. Ambientes úmidos com temperatura estável em torno dos 30 °C melhor favorecem a degradação microbiológica dos geossintéticos.

#### **2.4.6 Degradação química e ambiental**

Leflaive (1988) estudou a durabilidade de geotêxteis de PET exumados 17 anos depois da construção de um aterro, localizado na França. O autor mediu o pH do solo no momento da exumação dos geotêxteis e verificou que o pH variou entre 9 e 10. Foram realizados ensaios mecânicos (testes de tração) e ensaios de caracterização química. O autor concluiu que, dependendo da posição no aterro, seria possível encontrar resultados diferentes da degradação dependendo da distância da face de concreto e dos recalques. No entanto, não foi percebido nenhuma variação química ou biológica nas fibras de PET que indicassem que a redução de resistência verificada pelo autor pudesse estar ligada com a degradação química do polímero. O autor justificou a pequena perda de resistência por conta do recalque causado pelo peso próprio da camada de solo sobre o geotêxtil. Num outro ponto, onde houve uma maior redução de resistência do geotêxtil, o autor justificou que o geotêxtil estava apoiado parte sobre uma laje de concreto e parte sobre uma camada de solo, ocorrendo, assim, um recalque diferencial num ponto específico do geotêxtil.

Elias, Salman e Goulias (1998) estudaram o efeito do pH e das propriedades físicas na degradação de geogrelhas e geotextêis de PET. Os autores realizaram testes em: i) solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), com pH igual a 1; ii) em água destilada, com pH igual a 7; iii) em solução de hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), com pH igual a 10; e em, iv) solução de hidróxido de sódio (NaOH), com pH variando de 10 a 12. Os autores concluíram que em meio ácido e neutro o fator preponderante para a redução da tensão de tração é a cisão da cadeia molecular do polímero, que também provoca perda de massa. Em meio alcalino, o surgimento de erosões na superfície do polímero (perda de massa) é o fator preponderante para a redução da resistência à tração do geossintético. Os autores afirmaram que a perda de resistência à tração de uma geogrelha de PET protegida por PVC a 20 °C, utilizando o modelo de Arrhenius, foi de: i) 0,17 %/ano em solução de hidróxido de sódio (NaOH), com pH igual a 10, e de ii) 1,61 %/ano em solução de hidróxido de sódio (NaOH), com pH igual a 12.

Burgoyne e Merri (2007) estudaram a estabilidade à hidrólise de fibras de PET considerando seu uso no âmbito da engenharia civil. Os autores consideraram análises em que as amostras (30 testes no total) estiveram sempre em contato com água, realizando testes a 20 °C, e testes acelerados pelo aumento da temperatura – 50 °C, 70 °C e 85 °C – ou pela variação do pH – utilizando soluções de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH=4), Ca(OH)<sub>2</sub> (pH=11) e NaOH (pH=11). Os autores utilizaram dois tipos de fibras de PET que se diferenciavam apenas na concentração de grupos carboxílicos terminais. Os autores não notaram diferenças na degradação da utilização de soluções de Ca(OH)<sub>2</sub> e de NaOH; no entanto, encontraram dificuldades em manter a solução de Ca(OH)<sub>2</sub> com pH=11, além de notarem a formação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Os autores recomendaram a continuação da realização desses testes e concluíram que, em contato com a água em temperatura ambiente, a perda de resistência é pequena o que promove uma duração de alguns séculos segundo o modelo de previsão de vida útil proposto pelo autor. Os autores também observaram que a concentração de grupos carboxílicos terminais influenciou na taxa de degradação das fibras de forma direta.

Jailloux, Nait-Ali e Freitag (2008) estudaram os efeitos da hidrólise no poliéster de alta tenacidade utilizado em geossintéticos ao avaliar resultados de 10 anos de testes em diversos valores de pH (1 < pH < 13) e com temperaturas de 23 °C e 50 °C. Os autores observaram que, após 50% de perda de resistência, a taxa de degradação diminuiu consideravelmente, o que os autores atribuíram ao fato da degradação da fase cristalina do PET ser mais lenta que da fase amorfa. Os autores concluíram que a temperatura é um importante parâmetro responsável pelo aumento da taxa de degradação dos geossintéticos e o PET é mais susceptível à hidrólise em solos com temperaturas maiores que 35 °C.

Existe uma maior dificuldade em encontrar dados publicados sobre a degradação química de geogrelhas. Esse fato provavelmente dá-se por esse fenômeno não ser diretamente atribuído à degradação de geogrelhas. Por outro lado, esse fenômeno é bastante estudado com geomembranas e alguns geocompostos, dado que essas matérias são adequados para a utilização em aterros sanitários, onde o ambiente é quimicamente mais agressivo. Verifica-se uma maior dificuldade para encontrar dados relativos à degradação química de geogrelhas de PVA, uma vez que o PVA é recomendado para ambientes quimicamente agressivos – no âmbito da engenharia civil, observa-se estudos sobre o uso de fibras de PVA em reforço de concreto.

Akers *et al.* (1989) estudaram a durabilidade de fibras de PVA utilizada como reforço em matrizes cimentícias. Os autores avaliaram a durabilidade de amostras expostas por longos períodos (3 a 7 anos), na Suíça, e através de testes acelerados (2, 4 e 6 meses) em laboratório. Os autores concluíram que as fibras de PVA estudadas foram: i) resistentes à alta alcalinidade e a temperaturas até 80 °C; ii) testes acelerados em períodos de 2 meses apresentaram evidências de deterioração nas propriedades de tração, mas nenhuma mudança na estrutura cristalina; iii) embora possam haver pequenas alterações nas fibras de PVA em alguns casos, isso não influenciou as propriedades de tração das fibras individuais; e, iv) a utilização de fibras de PVA mostrou-se adequada para a utilização sob intemperismo natural por um período de 7 anos, e, de acordo com as análises realizadas, não houve razões para desacreditar da durabilidade desse material por longos períodos de tempo.

Nishiyama, Yamamoto e Hoshiro (2006) realizaram testes acelerados de degradação química em fibras de PVA empregadas como reforço de matrizes cimentícias. Os autores realizaram a degradação em solução alcalina de pH igual a 12,6 variando temperaturas na faixa de 20 °C a 70 °C. Os autores concluíram que a formação de grupos carboxílicos gerados pelo processo de oxidação durante a degradação pode ser apontada como a razão para a ocorrência de: i) descoloração e ii) redução de resistência das fibras de PVA. Os autores também verificaram que, por meio da quantidade de grupos carboxílicos formados, é possível dividir a previsão do tempo de vida pela equação de Arrhenius em 2 (duas) curvas distintas: i) de 20 °C a 40 °C, onde há uma menor degradação do polímero, e ii) de 50 °C a 70 °C, onde há uma maior degradação do polímero.

#### **2.4.7 Sinergia entre a degradação mecânica e química causada por RCD-R**

Santos (2011) estudou a degradação mecânica e química considerando 3 (três) cenários para a análise: i) compactação com rolo leve (1,45 kN); ii) compactação com compactador à percussão tipo “sapo” e iii) compactação com rolo leve e contato com RCD-R por um período de 15 (quinze) meses. O autor observou que a compactação feita com rolo provocou uma menor redução de resistência em relação às amostras compactadas com o compactador à percussão tipo “sapo”. Para as amostras enterradas por um período de 15 meses, o fator de redução apresentou incremento de 7% em relação às amostras apenas danificadas pela compactação com rolo. O autor justificou que, apesar de o pH do meio estar abaixo do limite

permitido para a utilização da geogrelhas de poliéster, as variações de temperatura e a compactação (que pode ter provocado a exposição das fibras), possibilitando, assim, a ocorrência de uma sinergia capaz de potencializar os danos sofridos pelo elemento de reforço. A Tabela 2.3 apresenta os fatores de redução obtidos por Santos (2011) para cada cenário analisado.

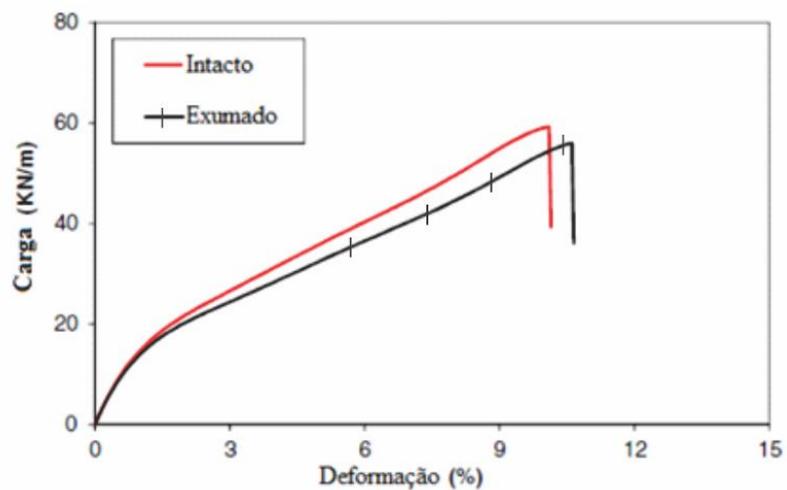
Tabela 2.3 – Fatores de redução de resistência da geogrelha à danos causados por RCD-R (Santos, 2011).

CENÁRIO	FATORES DE REDUÇÃO
Rolo leve manual	1,12
Compactador tipo “sapo”	1,28
Exumada	1,20

Vieira e Pereira (2015a) realizaram um estudo da degradação química e ambiental em 2 (dois) tipos de geossintéticos utilizando RCD-R numa estrutura de solo reforçado (ESR). Os autores construíram um experimento seguindo os seguintes procedimentos: i) limpeza da fundação; ii) construção de uma camada de 50 mm de espessura de RCD-R e compactação da mesma; iii) instalação de 8 (oito) amostras de geossintéticos; iv) colocação manual de RCD-R sobre as amostras e compactação até a obtenção de uma espessura final de 200 mm da camada; v) instalação de mais 8 (oito) amostras de geossintéticos e repetição do passo 'iv'; e, vi) compactação das encostas laterais e deposição de material para evitar erosão pela chuva. Os autores utilizaram um compactador do tipo placa vibratória e os geossintéticos escolhidos foram: i) uma geogrelha uniaxial constituída de polietileno de alta densidade (PEAD) e ii) um geotêxtil não tecido de polipropileno (PP) reforçado com fios de poliéster (PET). As amostras foram exumadas após um período de 6 (seis) meses.

Vieira e Pereira (2015a) verificaram nos resultados (pela comparação de amostras intactas e exumadas) que a geogrelha uniaxial de PEAD apresentou uma redução média de resistência à tração de 5,9% e redução da rigidez à tração da geogrelha. Para o geocomposto, a redução de resistência média foi de 16%; no entanto, o efeito da rigidez à tração não foi significativo. Os autores concluíram também, que a instalação não causou um dano significativo aos geossintéticos; contudo, identificou-se danos provocados por plantas e raízes no geotêxtil não tecido (base do geocomposto). A Figura 2.13 mostra a comparação entre as curvas de carga versus deformação entre as geogrelhas intactas e exumadas.

Figura 2.13 – Comparação entre as curvas de tensões de geogrelhas intactas e exumadas – modificado pelo autor (VIEIRA e PEREIRA, 2015a).



## **CAPÍTULO 3**

### **MATERAIS E METODOS**

Como o presente trabalho aborda uma proposta de aplicação de RCD-R num experimento que simula uma estrutura geotécnica, as amostras dos resíduos foram submetidas aos ensaios de caracterização de solos. Diante do enfoque do trabalho, foram realizadas também, a análise da composição gravimétrica e pH do RCD-R. As amostras de geogrelhas virgens e danificadas foram submetidas aos ensaios de resistência à tração e de microscopia e análise química.

#### **3.1 MATERIAIS**

##### **3.1.1 RCD-R**

Para a realização deste trabalho, definiu-se utilizar a brita graduada simples fino (BGS fino) como material de preenchimento na caixa de simulação, uma vez que esse material é produzido numa usina de reciclagem de RCD localizada na cidade de Aparecida de Goiânia-GO. Optou-se por empregar o BGS fino, composto por parcelas iguais de brita 0, brita 1 e areia – definido no item 2.1.2. A Figura 3.1 mostra uma pequena pilha de BGS fino no momento de uma coleta de material na usina.

Como o BGS fino não possui rachão em sua composição, ele pode ser considerado fisicamente menos agressivo aos geossintéticos, uma vez que, de acordo com as recomendações da FHWA (2009a), caso a dimensão máxima das partículas não ultrapasse 19 mm, o material de preenchimento pode ser considerado não agressivo. A FHWA (2009b) estipula que, desde que o valor de pH seja mantido dentro da faixa de 3 a 9, o material de preenchimento pode ser classificado como quimicamente não agressivo aos geossintéticos de PET. A FHWA não apresenta recomendações químicas sobre a faixa de pH para os geossintéticos de PVA.

Inicialmente, 4 (quatro) amostras de RCD-R foram coletadas com um intervalo médio de 21 dias, com o intuito de verificar a existência de eventuais variabilidades. Estimou-se que a

quantidade de material em cada coleta fosse, quando seco a umidade higroscópica, em torno de 65 a 80 kg. Posteriormente, foi realizada uma coleta considerando todo o RCD-R que seria empregado no experimento de campo, sendo o mesmo também caracterizado. Dessa forma, foram coletadas 5 amostras no total, quantidade tida como mínima para realizar a caracterização das amostras de controle e a determinação da faixa de variações das propriedades do RCD-R. A Tabela 3.1 apresenta os dados das coletas realizadas.

Tabela 3.1 – Coletas realizadas. (Próprio autor).

Coleta (amostra)	Dia	Chuva no dia da coleta	Chuva no dia anterior da coleta
RCD-R 1	20/10/2017	Não	Não
RCD-R 2	17/11/2017	Não	Sim
RCD-R 3	04/12/2017	Não	Sim
RCD-R 4	19/01/2018	Não	Sim
RCD-R 5	27/08/2018	Não	Não

Figura 3.1 – Detalhe do BGS fino obtido na usina de beneficiamento (bloco cerâmico com dimensões de 140 x 240 mm). (Próprio autor).



### 3.1.2 Geogrelhas

Definiu-se neste trabalho, por utilizar geogrelhas poliméricas devido às suas vantagens técnicas e econômicas em obras geotécnicas de reforços de solos. Nesse aspecto, entende-se que as geogrelhas estão associadas a obras com um longo período de vida útil, e, portanto, não é desejável que estas obras possam sofrer danos não esperados decorrentes da perda de parcelas de resistência.

Portanto, optou-se por utilizar geogrelhas de dois tipos de polímeros diferentes, uma de álcool polivinílico e poliamida (PVA/PA) e outra de poliéster (PET). A Tabela 3.2 apresenta as características das geogrelhas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.2 – Características das geogrelhas de PET e PVA/PA fornecidas pelo fabricante. (Próprio autor).

Polímero	Geogrelhas	
	PET	PVA/PA
Massa por unidade de área	180 g/m <sup>2</sup>	160 g/m <sup>2</sup>
Tamanho da abertura de malha	25 x 25 mm	20 x 30 mm
Tensão última de tração	35 kN/m	35 kN/m
Deformação máxima	≤10%	≤6%
Resistência química	2 < pH < 10	2 < pH < 13

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Determinação dos parâmetros geotécnicos, químicos e de composição dos RCD-R

Tendo em vista o propósito do uso do BGS fino como material de preenchimento de ESR, foi realizada a sua caracterização geotécnica de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) vigentes.

Os valores do potencial hidrogeniônico (pH) ao longo do período de realização do experimento de campo foram monitorados ensaiando os extratos lixiviados dos tanques, em cada cenário, coletados em 3 (três) alturas diferentes. Quando o cenário investigado não possibilitou a extração do lixiviado, foi considerado apenas o ensaio de pH a partir do material (RCD-R) coletado no momento da exumação das geogrelhas. Os ensaios de pH realizados nos RCD-R seguiram os procedimentos descritos pela norma *USEPA SW - 846 Test Method 9045: Soil and Waste pH* (USEPA, 2004).

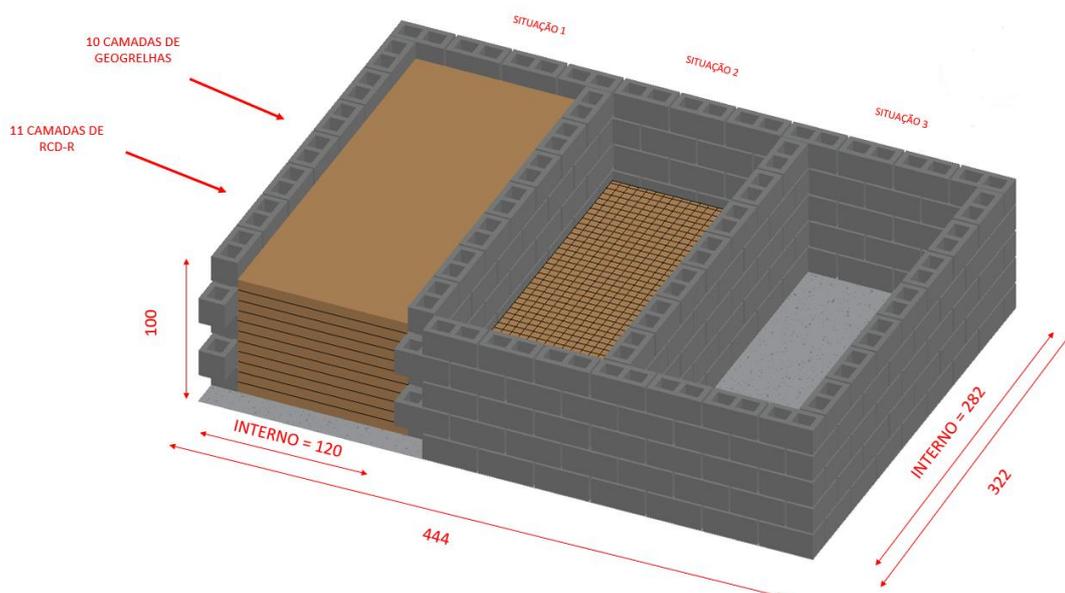
A caracterização gravimétrica foi realizada seguindo os procedimentos realizados por Santos (2011), com o uso de aproximadamente 10 kg de material (pesado em balança com precisão de 0,1 kg). Dessa forma, inicialmente o material foi passado na peneira de 4,75 mm de abertura; o material retido no peneiramento foi lavado em água corrente, seco ao ar até a evaporação do excesso de água e, então, levado para uma estufa – a uma temperatura entre

105 °C à 110 °C – por um período de 24 horas. Após o período de 24 horas em estufa, a amostra foi retirada e pesada em balança de precisão de 0,1 gramas. Finalmente, foi realizada a separação manual dos diferentes tipos de materiais contidos no RCD-R e pesados em balança de precisão de 0,01 gramas. O material passante na peneira de abertura 4,75 mm, inclusive o material removido no processo de lavagem, foi classificado como “solo”, dado que a separação manual de materiais de dimensões inferiores seria inviável.

### 3.2.2 Construção do experimento de campo

O experimento de campo consistiu em 3 (três) tanques (cada tanque com dimensões internas de 1,20 m de largura, 2,82 m de comprimento e 1,00 m de altura) construídos com blocos de alvenaria em concreto sobre um contrapiso de concreto magro. Para o acabamento dos tanques foram realizadas: i) 1 (uma) camada de reboco de regularização, ii) 3 (três) camadas de argamassa polimérica (para garantir estanqueidade), iii) 1 (uma) camada de chapisco com aditivo impermeabilizante e iv) 1 (uma) camada de reboco com aditivo impermeabilizante na parte interna de cada caixa. Os aditivos impermeabilizantes aplicados seguiram rigorosamente as recomendações dos fornecedores. O critério de escolha dos aditivos foi o ter um material que não solubilizasse os componentes químicos no experimento. Dessa forma, foram empregados aditivos recomendados para a impermeabilização de obras de reservatórios de água potável. A Figura 3.2 apresenta um desenho esquemático dos tanques.

Figura 3.2 – Desenho esquemático dos tanques experimentais. (Próprio autor).



Para cada tanque foi associado um cenário diferente de umidade, sendo eles: i) completamente inundado; ii) aberto ao ambiente externo, seguindo o regime de chuva da região; e iii) completamente seco. Foram instalados tubos de coleta do extrato lixiviado do RCD-R em diferentes alturas em relação ao piso (270 mm, 540 mm e 810 mm). Cada tanque, além de preenchido com RCD-R, contemplou a instalação de 10 (dez) camadas de geogrelhas, com o cuidado das geogrelhas não terem contato com as paredes dos tanques e com o ambiente externo durante o experimento. Cada camada de RCD-R variou de 70 a 90 mm de espessura. A Figura 3.3 ilustra algumas das fases da construção do experimento de campo. Os tanques, completamente inundados e secos, ficaram tampados e com certa ventilação durante o período de ensaio, para que se evitasse água provenientes de chuvas e amenizasse o aumento da temperatura nos períodos mais quentes do ano (Figura 3.4).

Figura 3.3 – Construção do experimento de campo: (a) blocos de concreto assentados com chapisco externo realizado; e (b) realização do teste de estanqueidade. (Próprio autor).



(a)



(b)

Figura 3.4 – Visão da cobertura dos tanques experimentais. (Próprio autor).



### 3.2.3 Simulação de danos de instalação e disposição das amostras de geogrelhas

Nesta pesquisa, as geogrelhas (PET e PVA/PA) foram instaladas em 2 (duas) condições de integridade: i) amostras virgens e ii) amostras danificadas. As amostras danificadas foram obtidas por meio de simulação de danos de instalação decorrentes do lançamento de material de aterro (BGS fino) durante a construção de estruturas de solo reforçado (ESR). O lançamento do material foi realizado de uma altura de 2,0m com o auxílio de uma pá carregadeira. Anteparos de borracha (mantas de borracha) foram empregadas para limitar a área de dano a 1,20m x 0,20m. O procedimento de simulação de dano não se limitou somente à área a ser ensaiada da geogrelha, sendo toda a dimensão da geogrelha (amostra de 1,20 x 1,40 m) danificada. A Tabela 3.3 mostra a ordem de inserção das geogrelhas e o período em que cada camada deverá ficar nos tanques antes de sua respectiva exumação.

Tabela 3.3 – Dados das camadas de geogrelha (tipos de polímeros, estado inicial de instalação das amostras e período de contato com o RCD-R). (Próprio autor).

Camada	Tipo de polímero	Estado de instalação	Período de contato com o RCD-R
1	PET	Virgem e Danificada	3 meses
2	PVA/PA	Virgem e Danificada	3 meses
3	PET	Virgem e Danificada	6 meses
4	PVA/PA	Virgem e Danificada	6 meses
5	PET	Virgem e Danificada	12 meses*
6	PVA/PA	Virgem e Danificada	12 meses*
7	PET	Virgem e Danificada	24 meses*
8	PVA/PA	Virgem e Danificada	24 meses*
9	PET	Virgem e Danificada	48 meses*
10	PVA/PA	Virgem e Danificada	48 meses*
Fundo	Geotêxtil não tecido		48 meses*

Legenda: (\*) Períodos de contato com o RCD-R que extrapolam o tempo de realização do mestrado.

Cada tanque recebeu amostras de geogrelhas virgens e danificadas na seguinte orientação:

- Amostras virgens: i) amostras de geogrelhas foram preparados com dimensões de 1,20 m x 1,40 m, ii) fez-se o isolamento (com silicone) das pontas dos elementos (longitudinais e transversais) cortados (Figura 3.5), e iii) instalou-se os corpos de prova no tanque.
- Amostras danificadas: i) amostras de geogrelhas foram preparadas com dimensões de 1,20 m x 1,40 m, ii) promoveu-se a simulação dos danos de instalação (lançamento de BGS fino de 2,0m de altura) nas geogrelhas, ii) fez-se o isolamento (com silicone) das pontas dos elementos (longitudinais e transversais) previamente cortados e iv) instalou-se as amostras no tanque. A Figura 3.6 ilustra como foi executado o preenchimento dos tanques experimentais.

Figura 3.5 – Detalhe da selagem das geogrelhas. (Próprio autor).

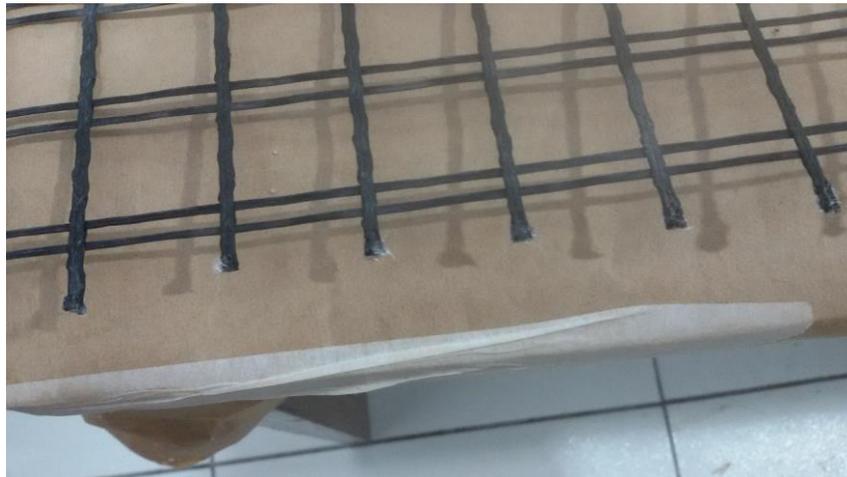
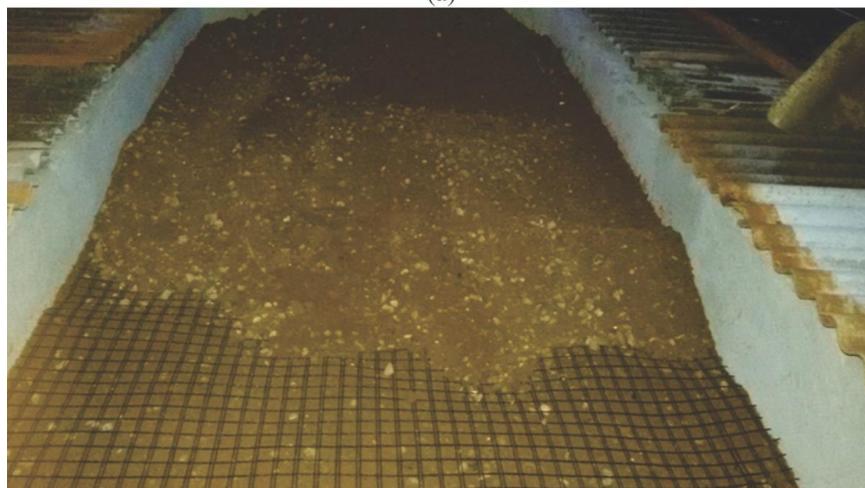


Figura 3.6 – Preenchimento dos tanques experimentais: – (a) detalhe da instalação de filtro (brita 0 e geotêxtil não tecido) próximo ao tubo de coleta; e (b) instalação de amostra de geogrelha e camada de RCD-R no tanque chuva. (Próprio autor).



(a)



(b)

### 3.2.4 Análises dos materiais extraídos dos tanques experimentais

Após cada exumação, as amostras de geogrelhas (1,20 x 1,40 m) foram novamente cortadas buscando a obtenção de 5 (cinco) corpos de prova, com as dimensões de 1,20 x 0,20 m, para a realização dos ensaios resistência à tração. Vale ressaltar que todos os processos de exumação e acondicionamento das amostras foram realizados manualmente, de modo a não gerar danos adicionais. Os materiais excedentes foram armazenados como corpos de prova reserva e também para a realização de análises de microscopia no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e de espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX). As amostras submetidas aos ensaios de MEV foram preparadas suporte (*stub*) capaz de ter 4 (quatro) elementos e foram realizados com feixe de elétrons secundários variando de acordo com a necessidade de 2,5 a 5 kV, realizando aumentos de imagem de: i) 50 vezes, ii) 500 vezes e iii) 1000 vezes. O aumento de 500 vezes foi escolhido para a realização do ensaio de EDX com um feixe de elétrons secundários de 15 kV.

Imediatamente antes de cada exumação realizada, foram coletadas amostras dos tubos de coleta de cada tanque. Na 1ª exumação, o tanque chuva possibilitou coletas apenas nos tubos mais baixos; na 2ª exumação, foram realizadas coletas de todos os tubos. No tanque inundando, foi possível fazer coleta de águas em todos os tubos e nas duas exumações. As análises foram realizadas segundo as metodologias da *Standard Methods* (SWM), com as análises dos parâmetros de alcalinidade (SWM 2320B); cloreto (SWM 4500-Cl<sup>-</sup> B); fluoreto (SWM 4500-F<sup>-</sup> D); alumínio (SWM 3500-Al B); e ferro (SWM 3500-Fe B).

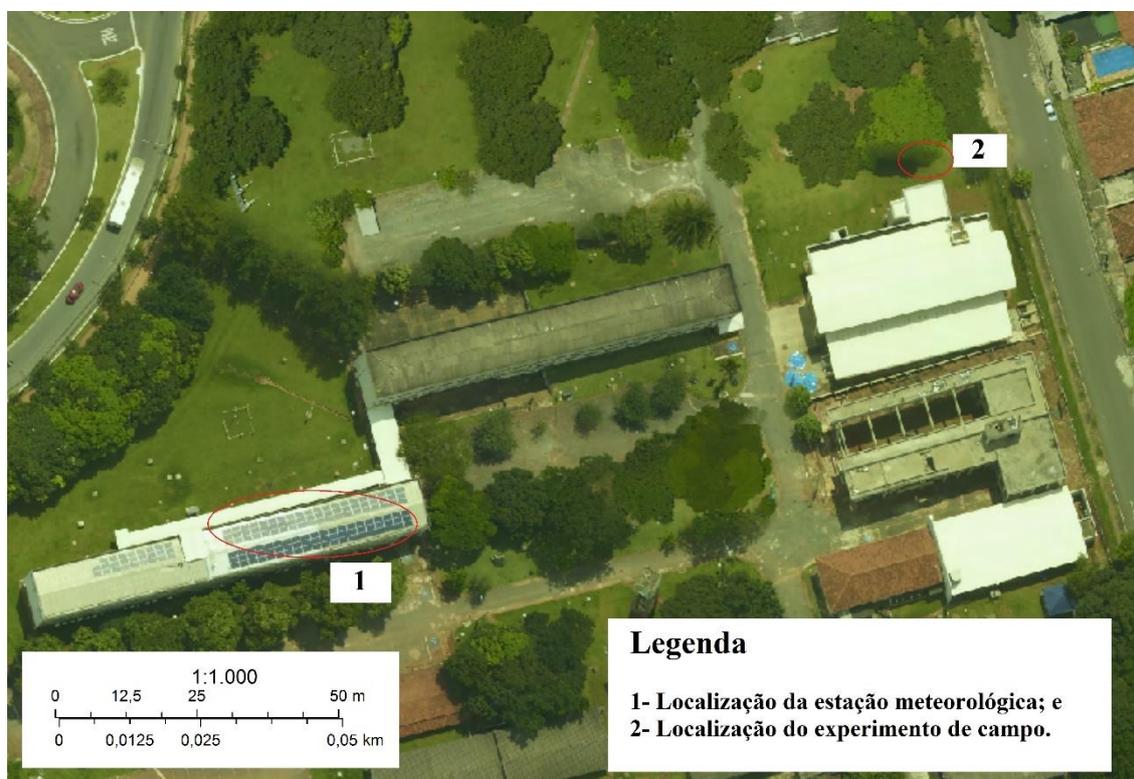
Na segunda exumação, amostras de RCD-R também foram coletadas de posições em contato com as geogrelhas, evitando retirar material da camada imediatamente abaixo das geogrelhas. As amostras de RCD-R coletados foram submetidas à caracterização geotécnica como o objetivo de avaliar a ocorrência eventuais alterações de suas propriedades após o período ensaio de campo. O material aquoso extraído do RCD-R logo antes do início da exumação foi analisado com o intuito de verificar as concentrações e possíveis variações de metais dissolvidos ao longo das 5 (cinco) exumações pré-determinadas neste experimento.

### 3.2.5 Obtenção dos dados meteorológicos – Temperatura do ar

De modo a avaliar as condições no ambiente de realização dos ensaios de campo, dados meteorológicos foram obtidos de uma estação meteorológica instalada a aproximadamente 150 m dos tanques experimentais, localizada no Bloco B, da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), da Universidade Federal de Goiás (UFG), nas coordenadas  $-16^{\circ} 40'38,5''$  S e  $-49^{\circ}14'30,8''$  W. (EMC/UFG, 2019)

Os dados obtidos de temperatura do ar foram tratados e, posteriormente, utilizados para a confecção de gráficos para que possibilitassem a obtenção de análises relativas ao programa experimental. A partir dos dados de temperatura do ar, foram calculados os valores médios de 10:00h às 17:00h em relação aos dias de coleta. Os dados da estação meteorológica podem ser encontrados no seguinte link: <<https://sites.google.com/site/sfvemcufg/weather-station>>. A Figura 3.7 apresenta a localização da estação meteorológica.

Figura 3.7 – Imagem por satélite da EECA-UFG contendo a localização da estação meteorológica e do experimento de campo – modificado pelo autor (MAPA FÁCIL, 2019).



### 3.2.6 Tratamento dos dados resultantes dos ensaios de tração nas geogrelhas

As análises estatísticas foram realizadas com o uso da Distribuição de Student, uma vez que esta análise é aplicada para análise de pequenas populações (menores que 30 amostras) (Santos, Vilar e Assis; 2009). Os cálculos dos intervalos de confiança foram realizados empregando-se a Equação 3.1:

$$T = \bar{X} \pm t_{\alpha/2} \cdot \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right)$$

(3.1)

Onde:

T = valor do limite dado pelo intervalo de confiança;

$\bar{X}$  = média amostral;

$t_{\alpha/2}$  = valor da distribuição de Student padronizada;

s = desvio padrão; e

n = número de amostras.

As análises foram aplicadas nos dados de: i) carga na ruptura, ii) deformação na ruptura e ii) força a 2% de deformação das geogrelhas. O nível de confiança aplicado foi aquele definido tomando como referência os valores obtidos nos ensaios das amostras virgens (PET sem danos e PVA sem danos), de modo que todos os valores fossem contemplados. Os resultados das demais amostras foram comparados aos das amostras virgens.

Os FR foram calculados da seguinte forma: i) caso os valores médios dos ensaios das amostras virgens danificadas ou provenientes de exumação estivessem dentro do intervalo de

confiança das amostras virgens (sem danos), adotou-se o FR igual a 1,0; ii) caso os valores médios dos ensaios das amostras virgens danificadas ou provenientes de exumação estivessem fora (acima ou abaixo) do intervalo de confiança das amostras virgens (sem danos), realizou-se a divisão entre os valores médios das amostras virgens (sem danos) e os valores médios da respectiva amostra em análise. Desta forma, amostras com médias menores que a média virgem (sem danos), possuem FR maiores que 1,0 (significando redução desta propriedade), e amostras com médias maiores que a média virgem (sem danos) possuem FR menores que 1,0 (significando aumento desta propriedade).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises da caracterização geotécnica do RCD-R, identificando as eventuais variabilidades de 5 (cinco) amostras de RCD-R. Também são apresentadas as caracterizações dos materiais (3 amostras) de preenchimento dos tanques e da 2ª exumação (realizada no 180º dia após o início do experimento). São apresentados também as análises de pH e temperaturas do experimento e as análises de parâmetros obtidos dos líquidos extraídos dos tanques no momento da exumação. São apresentados também análises de ensaios de MEV e de EDX realizados com as amostras de geogrelhas e as análises dos resultados de resistência à tração para os cenários analisados.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA, QUÍMICA E DE COMPOSIÇÃO DOS RCD-R

##### 4.1.1 Massa específica dos sólidos

Os ensaios de massa específica dos sólidos passante na peneira 2,0 mm revelaram um valor médio de 2,687 g/cm<sup>3</sup>, com um desvio padrão de 0,01, e um coeficiente de variação (CV) de 0,47 %. Os valores mostraram que a massa específica dos materiais passante na peneira de 2,0 mm apresentou uma baixa variabilidade, inferior às apresentadas em trabalhos citados anteriores (Tabela 2.1). Os valores obtidos nos ensaios de massa específica dos sólidos estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos dos RCD-R de controle. (Próprio autor).

Amostras	Massa específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )
RCD-R 1	2,689
RCD-R 2	2,692
RCD-R 3	2,691
RCD-R 4	2,665
RCD-R 5	2,697
Valor médio	2,687

Desvio Padrão	0,01
Coefficiente de Variação (%)	0,47

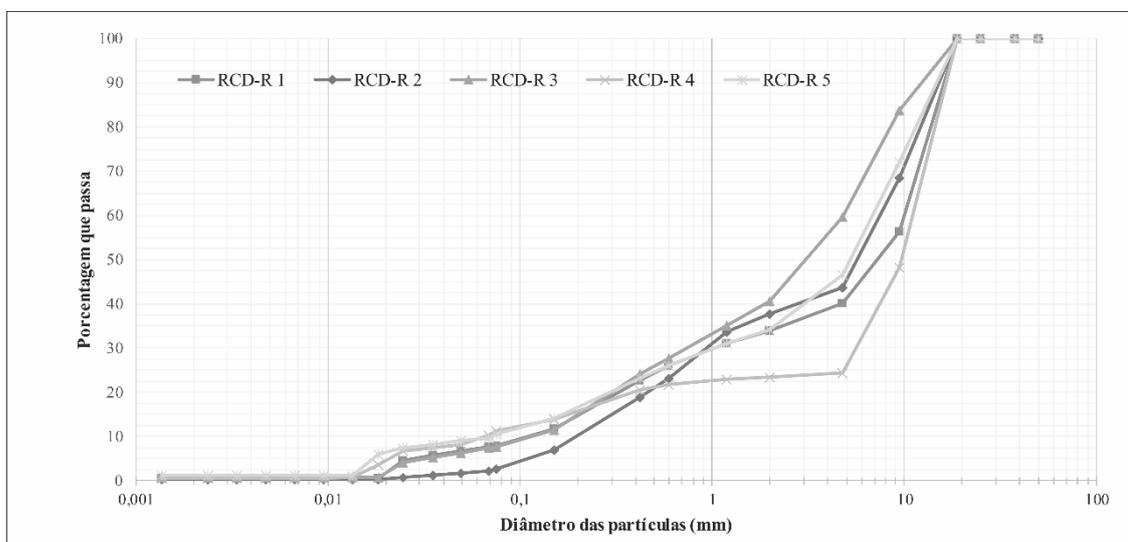
### 4.1.2 Análise granulométrica

A análise das curvas de distribuição granulométricas das diferentes amostras de RCD-R revelou baixa variabilidade, o que pode ser explicado pela adoção de um padrão de produção de beneficiamento deste material por parte da usina. Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o maior número de amostras de RCD-R pôde ser classificado como um pedregulho bem ou mal graduado com presença de areia e/ou silte, variando de acordo com a data de beneficiamento do resíduo; uma das amostras foi classificada como areia bem graduada com silte e pedregulho. O resumo dos resultados das análises granulométricas do RCD-R é apresentado na Tabela 4.2. As curvas granulométricas das amostras ensaiadas e os coeficientes de variação em cada abertura são apresentadas na Figura 4.1.

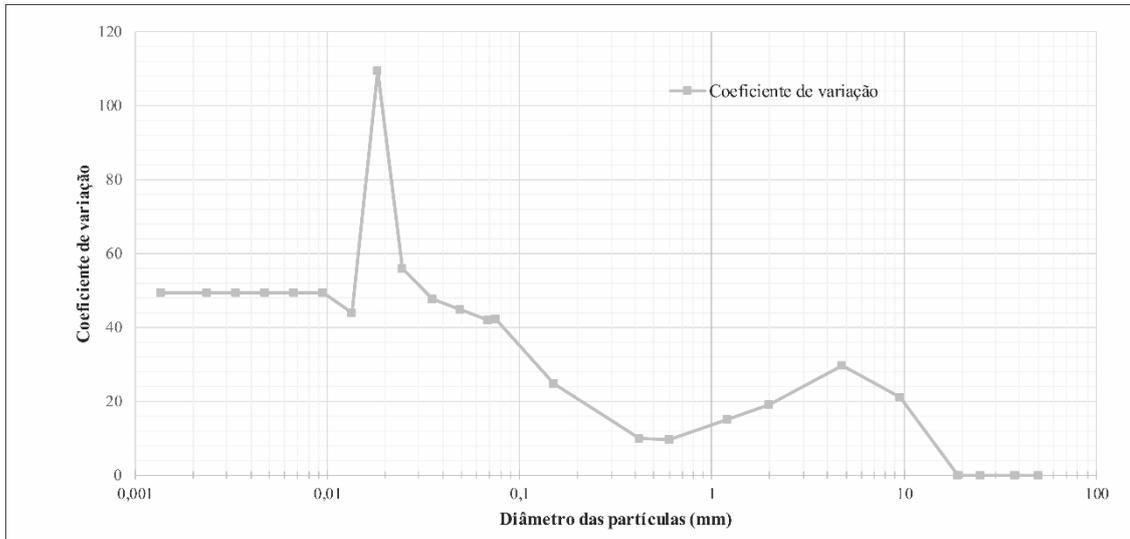
Tabela 4.2 – Classificação SUCS dos RCD-R de controle. (Próprio autor).

Amostras	Classificação SUCS
RCD-R 1	GW-GM (Pedregulho bem graduado com areia e silte)
RCD-R 2	GW (Pedregulho bem graduado)
RCD-R 3	SW-SM (Areia bem graduada com silte e pedregulho)
RCD-R 4	GP-GM (Pedregulho mal graduado com areia e silte)
RCD-R 5	GW-GM (Pedregulho bem graduado com areia e silte)

Figura 4.1 – Resultados de ensaios de granulometria: (a) curvas granulométricas das amostras de RCD-R, e (b) coeficientes de variação para os diâmetros das partículas do RCD-R. (Próprio autor).



(a)



(b)

A análise dos coeficientes de variação revelou um valor de CV igual a 109,52% no diâmetro da partícula de 0,0184 mm, sendo esse o maior valor observado. Verificou-se que abaixo do diâmetro da partícula de 0,0184 mm, houve uma baixa variação dos valores de CV (em torno de 50%). Acima do diâmetro da partícula de 0,0184 mm foi observado uma oscilação dos valores de CV com uma queda seguida de um acréscimo de valores. No entanto, vale ressaltar que o alto valor de CV (109,52%) ocorreu principalmente devido à amostra de RCD-R 2, que se destacou das demais curvas no trecho final da distribuição granulométrica. Chama-se a atenção para os valores de CV iguais a zero a partir do diâmetro da partícula igual a 19 mm, que se deu por conta da inexistência de partículas maiores no material ensaiado.

### 4.1.3 Índices de Consistência

Todas as amostras de RCD-R ensaiadas apresentaram comportamento não plástico. Segundo a norma BS 8006 (2010) e FHWA (2009a), esse é um ponto positivo, uma vez que esse material não possui parcela de resistência coesiva, sendo uma característica recomendada para o material de preenchimento de estruturas de solo reforçado (ESR) com geossintéticos.

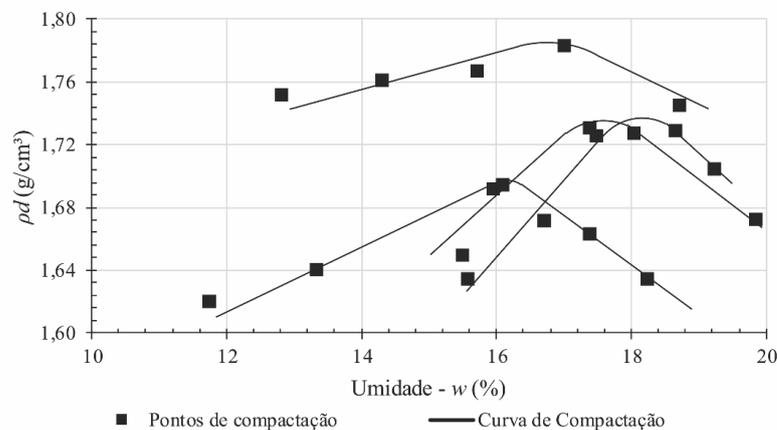
#### 4.1.4 Compactação

Os ensaios de compactação revelaram um valor médio de massa específica seca máxima ( $\rho_{d_{\text{máx}}}$ ) de 1,740 g/cm<sup>3</sup>, com coeficiente de variação de 2,04%; e um valor médio de umidade ótima ( $w_{\text{ot}}$ ) de 17,3%, com coeficiente de variação de 4,50%. Não foi possível a realização da compactação com a amostra RCD-R 4 devido à pouca presença de fino – o que pode ser verificado na curva granulométrica do RCD-R 4 apresentada na Figura 4.1 (a). Este fator pode ser atribuído ao fato de ter chovido no dia anterior da coleta, o que faz com que partículas mais finas fiquem aderidas às partículas maiores e, portanto, sendo direcionadas à esteiras de brita e/ou rachão. A Figuras 4.2 apresenta as curvas de compactação das amostras de RCD-R ensaiadas na energia Proctor normal, sem reuso de material e no cilindro grande. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compactação e para o desvio padrão e o coeficiente de variação de  $\rho_{d_{\text{máx}}}$  (g/cm<sup>3</sup>),  $w_{\text{ot}}$  (%).

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de compactação dos RCD-R de controle. (Próprio autor).

Amostra	$\rho_{d_{\text{máx}}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{\text{ot}}$ (%)
RCD-R 1	1,696	16,3
RCD-R 2	1,738	17,6
RCD-R 3	1,742	18,1
RCD-R 4	-	-
RCD-R 5	1,783	17,0
Média	1,740	17,3
Desvio padrão	0,04	0,78
Coeficiente de variação	2,04	4,50

Figura 4.2 – Curva de compactação das amostras dos RCD-R de controle. (Próprio autor).



#### 4.1.5 Composição gravimétrica

Os ensaios de composição gravimétrica revelaram que as amostras de RCD-R possuem uma grande quantidade de materiais nobres (Classe A), com concreto, argamassas e solo constituindo a maior parcela da composição desses resíduos. A participação de materiais cimentícios variou de 35,11 a 77,79%; enquanto a parcela de solo variou de 13,73 a 61,19%. Notou-se que apenas a amostra de RCD-R 1 apresentou uma grande quantidade (7,63%) de materiais cerâmicos vermelhos (tijolos e telhas). Verificou-se que as parcelas de materiais cimentícios e solo juntas apresentaram no mínimo 87,48% da composição dos RCD-R ensaiados, como esse valor mínimo sendo observado no RCD-R 1. Os resultados percentuais da análise gravimétrica, para cada amostra, estão apresentados na Tabela 4.4. A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos resultados de acordo com as classes determinadas pela resolução 307 (CONAMA, 2002).

Tabela 4.4 - Composição gravimétrica classificada por tipos de materiais. (Próprio autor).

Materiais	Participação em massa (%)				
	RCD-R 1	RCD-R 2	RCD-R 3	RCD-R 4	RCD-R 5
Partículas de concreto e argamassas	41,79	59,94	36,26	78,64	50,05
Mat. Cerâmicos (Tijolos e Telhas)	7,63	0,51	0,90	4,55	1,14
Mat. Cerâmicos (Revestimentos)	0,50	0,17	0,15	0,92	0,20
Solo	48,63	37,54	61,19	13,73	47,17
Betume	0,17	0,03	0,10	0,53	0,68
Materiais rochosos	0,71	1,61	1,21	0,64	0,39
Madeira	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
Plástico	0,02	0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Borracha	<0,01	<0,01	-	-	-
Vidro	0,04	-	0,02	0,02	0,02
Gesso	0,44	0,14	0,13	0,93	0,29
Papel/Papelão	0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,01
Metal	0,01	-	-	<0,01	0,06
Tecido	<0,01	-	<0,01	<0,01	<0,01
Isopor	-	<0,01	-	-	<0,01
Espuma	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Carvão	-	<0,01	<0,01	-	-
Casca de Tinta	0,01	<0,01	-	-	<0,01
Outros	0,01	-	0,02	-	-

Tabela 4.5 – Resultados da análise gravimétrica de acordo com as classes determinadas pela resolução CONAMA 307/2002. (Próprio autor).

Amostra	Classes (%)			
	A	B	C	D
RCD-R 1	99,42	0,55	0,01	0,01
RCD-R 2	99,81	0,18	< 0,01	< 0,01
RCD-R 3	99,81	0,17	0,02	0
RCD-R 4	99,00	1,00	< 0,01	0
RCD-R 5	99,62	0,38	< 0,01	< 0,01

#### 4.1.6 Potencial hidrogeniônico

Os resultados dos ensaios de pH evidenciaram o caráter alcalino das amostras de RCD-R ensaiadas. O valor médio foi de 11,38 para os ensaios com água destilada (Tabela 4.6), o que está de acordo com o encontrado nos trabalhos citados no referencial bibliográfico (Santos, 2007 e 2011; Arulrajah *et al.*, 2013; dentre outros) e pode ser explicada pela predominância de partículas provenientes de concreto.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de pH. (Próprio autor).

Amostra	pH em água destilada
RCD-R 1	11,50
RCD-R 2	11,60
RCD-R 3	11,77
RCD-R 4	12,03
RCD-R 5	10,00
Valor médio	11,38
Desvio Padrão	0,80
Coefficiente de Variação (%)	7,00

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA, QUÍMICA E DE COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RCD-R EMPREGADO NOS TANQUES EXPERIMENTAIS

Este item apresentará a caracterização geotécnica, química e gravimétrica do RCD-R empregado nos tanques experimentais. Ressalta-se que a coleta desse material foi realizada em apenas 01 (um) dia e que o volume total foi da ordem de 16 m<sup>3</sup>, com aproximadamente 10,5 m<sup>3</sup> sendo utilizados para o preenchimento dos tanques experimentais.

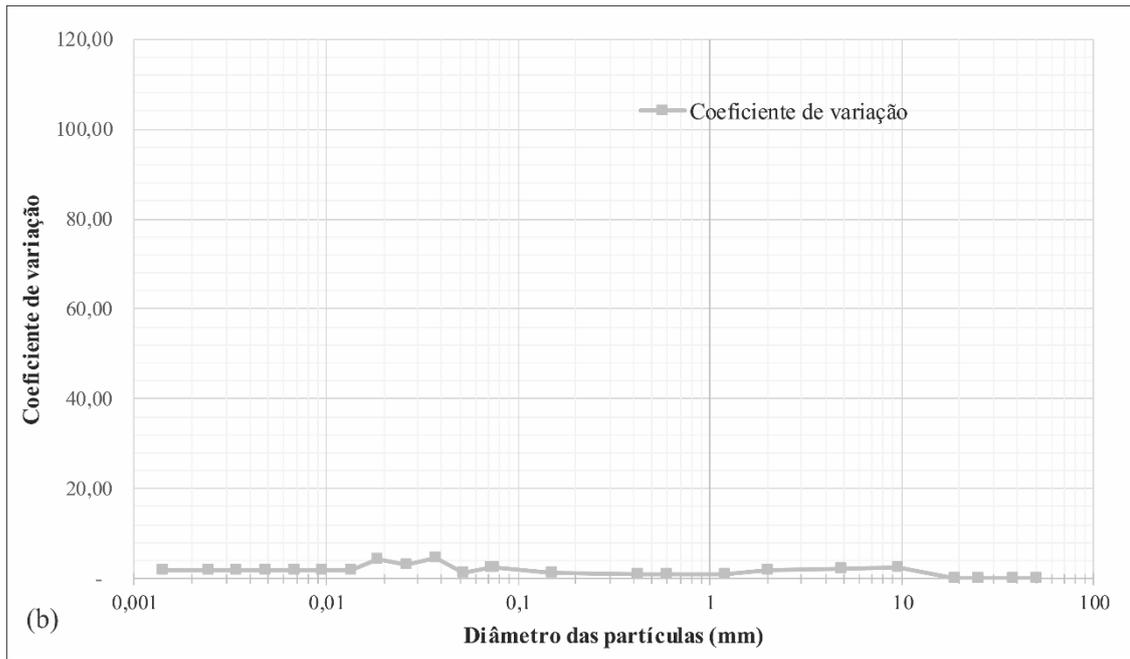
### 4.2.1 Massa específica dos sólidos

Os ensaios de massa específica dos sólidos passante na peneira 2,0 mm revelaram um valor médio de 2,719 g/cm<sup>3</sup>, com um desvio padrão de 0,02, e um coeficiente de variação de 0,81 %. Os resultados mostraram-se com um leve aumento dessa propriedade em relação às amostras das primeiras 5 coletas (material de controle). No entanto, devido à variabilidade visualizada no material de controle, esse parâmetro pode ser considerado dentro do previsto se comparado com os resultados de outras pesquisas realizadas com RCD-R provenientes da mesma usina (Fleury, 2018). Os valores observados também se encontram próximos dos obtidos por pesquisas que caracterizaram os solos da região de Goiânia-GO (Cardoso; 2010). Os valores obtidos nos ensaios de massa específica dos sólidos estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos do RCD-R empregado no preenchimento dos tanques experimentais. (Próprio autor).

Amostras	Massa específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )
Tanque Seco	2,719
Tanque Chuva	2,697
Tanque Inundado	2,741
Valor médio	2,719
Desvio Padrão	0,02
Coeficiente de Variação (%)	0,81





(b)

### 4.2.3 Índices de Consistência

Todas as amostras de RCD-R ensaiadas apresentaram comportamento não plástico. Esse fato dá-se pela falta de resistência coesiva nesse material. Como comentado anteriormente, este é um ponto positivo para a sua utilização em ESR, como sugerido pela FHWA (2010a) e BS 8006 (2010), normativas que recomendam a utilização de material granular na construção de ESR.

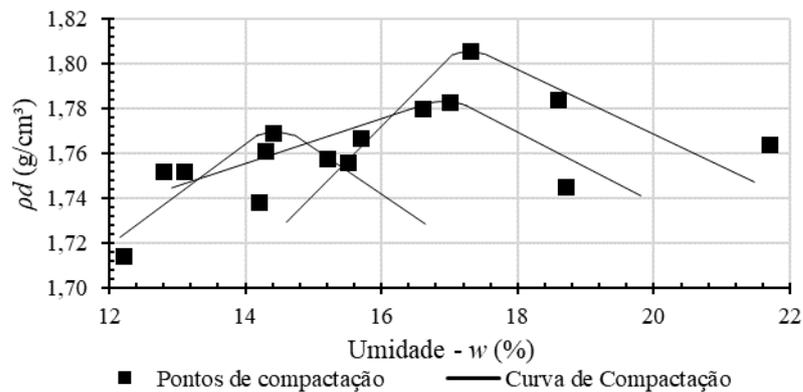
### 4.2.4 Compactação

Os ensaios de compactação revelaram um valor médio de massa específica seca máxima ( $\rho_{d_{m\acute{a}x}}$ ) de 1,786 g/cm<sup>3</sup>, com coeficiente de variação de 1,05%; e um valor médio de umidade ótima ( $w_{ot}$ ) de 16,2%, com coeficiente de variação de 9,82%. Observou-se que os resultados dos materiais empregados no preenchimento dos tanques foram praticamente os mesmos verificados nas amostras de controle. A Figura 4.4 apresenta as curvas de compactação das amostras de RCD-R (Proctor normal), sem reuso de material e no cilindro grande. A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compactação e para o desvio padrão e o coeficiente de variação de  $\rho_{d_{m\acute{a}x}}$  (g/cm<sup>3</sup>),  $w_{ot}$  (%).

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de compactação do RCD-R de preenchimento. (Próprio autor).

Amostra	$\rho_{d\text{máx}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)
Tanque Seco	1,769	14,4
Tanque Chuva	1,783	17,0
Tanque Inundado	1,806	17,3
Média	1,786	16,2
Desvio padrão	0,02	1,59
Coefficiente de variação	1,05	9,82

Figura 4.4 – Curvas de compactação das amostras de preenchimento dos tanques experimentais. (Próprio autor).



#### 4.2.5 Composição gravimétrica

A análise de composição gravimétrica revelou que as amostras de RCD-R apresentaram uma grande quantidade de materiais nobres (Classe A), sendo que os materiais cimentícios e o solo apareceram como a maior parcela da composição desses resíduos. Os materiais cimentícios e a parcela de solo corresponderam a cerca de 50%, mantendo pouca variação. Notou-se que a quantidade de materiais cerâmicos provenientes de tijolos e telhas (material cerâmico vermelho) ficou em torno de 1%, enquanto que o gesso representou cerca de 0,3% da massa total. Deste modo, pode-se verificar que esse resíduo trata-se de um material altamente nobre, possuindo uma pequena parcela de gesso (principal contaminante). Os resultados da análise do percentual gravimétrico para cada amostra de preenchimento dos tanques experimentais estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Composição gravimétrica classificada por tipo de materiais para as amostras de preenchimento dos tanques. (Próprio autor).

Materiais	Amostras dos tanques (%)		
	Seco	Chuva	Inundado
Partículas de concreto e argamassas	49,87	50,05	48,84
Mat. Cerâmicos (Tijolos e Telhas)	0,94	1,14	1,07
Mat. Cerâmicos (Revestimentos)	0,27	0,20	0,17
Solo	47,21	47,17	48,77
Betume	0,76	0,68	0,49
Materiais rochosos	0,54	0,39	0,23
Madeira	0,02	0,01	0,01
Plástico	0,00	0,00	0,01
Borracha	0,01	-	0,00
Vidro	-	0,02	0,02
Gesso	0,35	0,29	0,30
Papel/Papelão	0,01	0,01	0,01
Metal	-	0,06	0,09
Tecido	0,02	0,00	-
Isopor	-	0,00	0,00
Espuma	0,00	0,00	0,00
Carvão	-	-	-
Casca de Tinta	0,00	0,00	-
Outros	-	-	0,00

#### 4.2.6 pH

Os resultados de pH evidenciaram o caráter alcalino das amostras de RCD-R que foram empregadas no preenchimento dos tanques experimentais. Os resultados mostraram valores de pH próximos a 10. A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de pH.

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de pH do RCD-R de preenchimento. (Próprio autor).

Amostra	Água Destilada
Tanque seco	9,67
Tanque chuva	10,00
Tanque inundado	10,64

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA, QUÍMICA E DE COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RCD-R DA 2ª EXUMAÇÃO

Este item apresentará a caracterização geotécnica, química e gravimétrica dos RCD-R empregados nos tanques experimentais coletados durante a 2ª exumação. Ressalta-se que a coleta desse material foi realizada em apenas 01 (um) dia.

#### 4.3.1 Massa específica dos sólidos

Os ensaios de massa específica dos sólidos passante na peneira 2,0 mm revelaram um valor médio de 2,730 g/cm<sup>3</sup>, com um desvio padrão de 0,01, e um coeficiente de variação de 0,31 %. Os resultados mostraram que os valores encontrados estavam dentro da variação esperada para esse RCD-R, mostrando, assim, que não houve variação desse parâmetro ao longo dos 180 dias. Os valores obtidos nos ensaios de massa específica dos sólidos estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos do RCD-R empregado no preenchimento dos tanques experimentais após a 2ª exumação. (Próprio autor).

Amostras	Massa específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )
Seco	2,731
Chuva	2,721
Inundado	2,738
Valor médio	2,730
Desvio Padrão	0,01
Coeficiente de Variação (%)	0,31

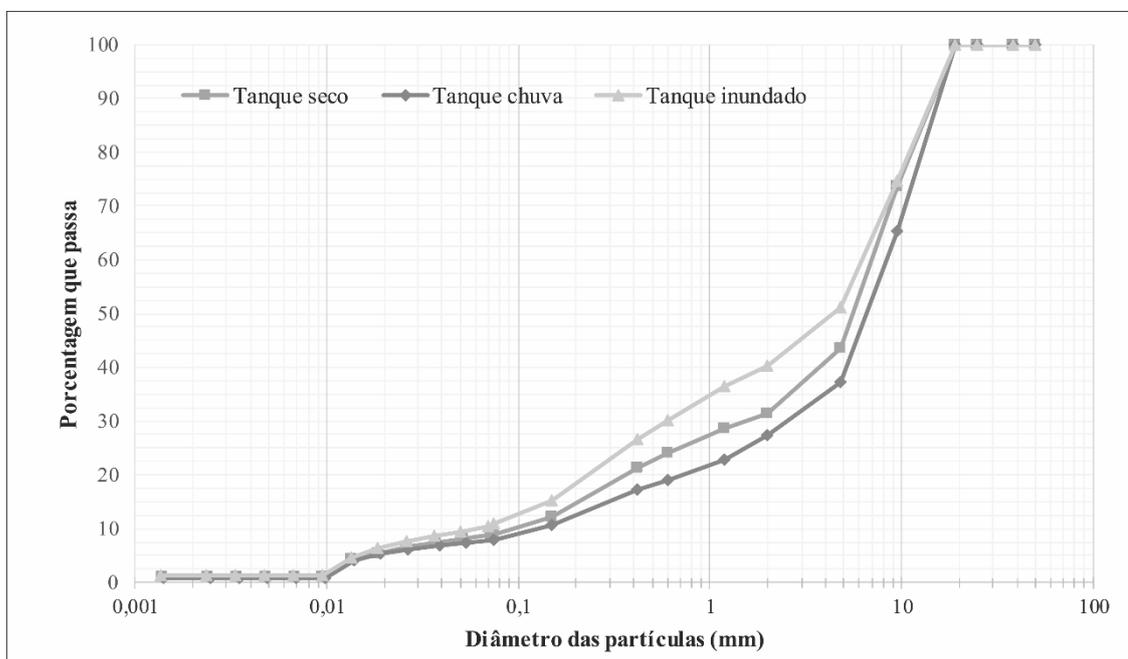
#### 4.3.2 Análise granulométrica

A análise das curvas de distribuição granulométricas das diferentes amostras de RCD-R coletadas na 2ª exumação dos tanques revelou uma variação em relação as curvas visualizadas no momento do preenchimento. Observou-se que: i) o RCD-R do tanque seco não alterou

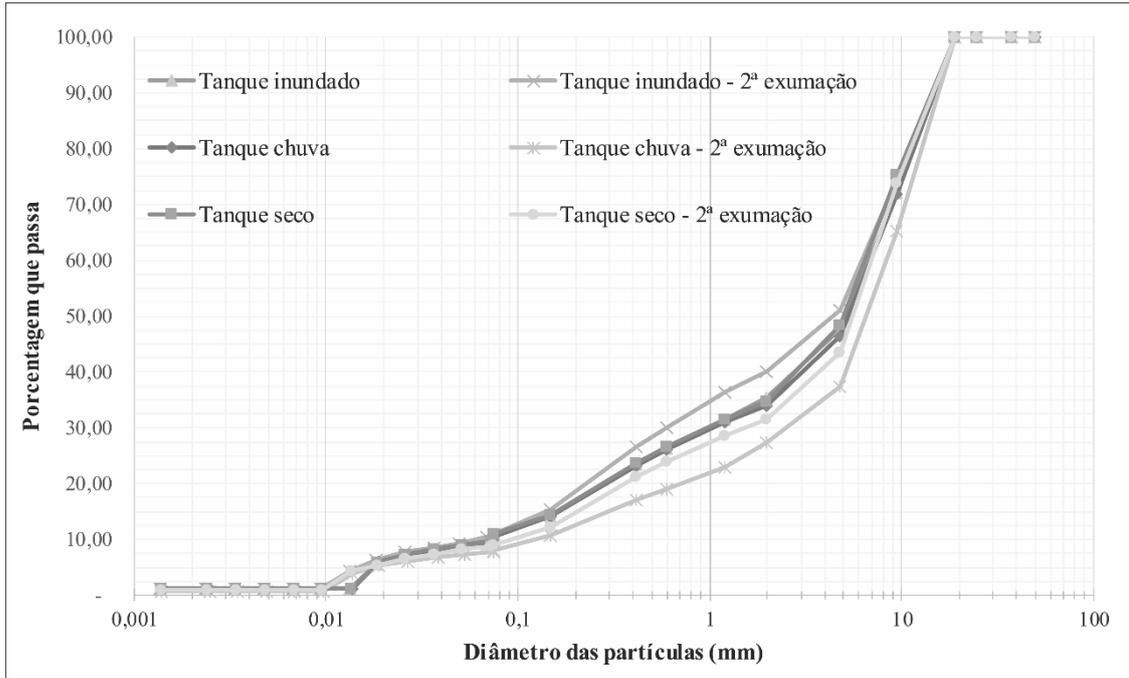
significativamente a sua curva granulométrica. ii) o RCD-R do tanque inundado diminuiu a dimensão de suas partículas e iii) o RCD-R do tanque inundado aumentou a dimensão de suas partículas. Esses fatos demonstram a influência da condição de saturação dos RCD-R.

No tanque inundado, o ambiente saturado durante todo o período experimental deve ter propiciado a desagregação de algumas partículas que fez com que as dimensões das partículas diminuíssem. No tanque de chuva, a água encheu lentamente o tanque, possibilitando a ocorrência de ciclos de umedecimento e secagem, dado que tal cenário tinha o material exposto à insolação. Portanto, tal ciclo nesse ambiente, pode ter favorecido a formação de agregações de partículas, aumentando, assim, as dimensões das partículas visualizada na curva granulométrica. As curvas granulométricas das 3 (três) amostras ensaiadas da 2ª exumação e os coeficientes de variação de cada diâmetro das partículas são apresentadas na Figura 4.5.

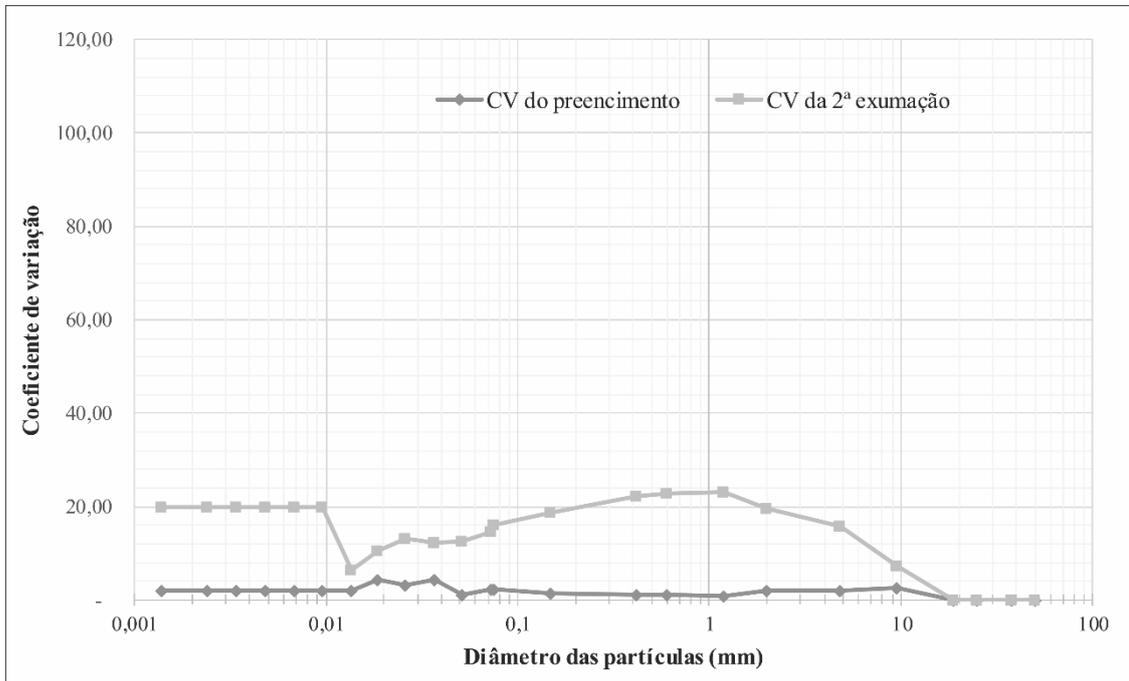
Figura 4.5 – Resultados de ensaios de granulometria: (a) Curvas granulométricas das amostras do RCD-R empregados nos tanques experimentais após a 2ª exumação; e, (b) Curvas granulométricas das amostras do RCD-R empregados nos tanques experimentais no momento do preenchimento e após a 2ª exumação; e (c) Coeficientes de variação dos diâmetros das partículas do RCD-R após a 2ª exumação. (Próprio autor).



(a)



(b)



(c)

### **4.3.3 Índices de Consistência**

Todas as amostras de RCD-R ensaiadas apresentaram comportamento não plástico. Portanto, verificou-se que não houve mudança desse parâmetro em relação ao RCD-R no momento de preenchimento. Não alterar suas características de consistência ao longo do tempo é um ponto positivo para sua utilização em ESR, uma vez que não possui parcelas de resistência coesiva é um ponto positivo para a sua utilização como material de preenchimento (FHWA; 2009a e BS 8006; 2010).

### **4.3.4 Composição gravimétrica**

A análise de composição gravimétrica revelou que as amostras de RCD-R apresentaram uma grande quantidade de materiais nobres (Classe A), sendo que os materiais cimentícios e o solo apareceram como a maior parcela da composição desses resíduos. Os materiais cimentícios e a parcela de solo apresentaram variações em relação ao verificado nas amostras no momento de preenchimento.

Este fato deu-se por conta das variações das curvas granulométricas, uma vez que o material passante na peneira de abertura 4,8 mm foi inicialmente considerado com ‘solo’, e, assim, uma quantidade maior ou menor passante nessa peneira altera diretamente a análise gravimétrica do material. Notou-se uma diminuição da quantidade de gesso nas amostras exumadas dos tanques inundado e de chuva (materiais que tiveram contato com água), o que pode ser creditado a desagregação desse material. No entanto, devido a pequena quantidade verificada desse material, faz-se necessário maiores análises para verificar essa observação. Os resultados da análise do percentual gravimétrico para cada amostra de preenchimento dos tanques experimentais estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Composição gravimétrica classificada por tipo de materiais para as amostras da 2ª exumação dos tanques. (Próprio autor).

Materiais	Amostras dos tanques (%) – 2ª exumação		
	Seco	Chuva	Inundado
Partículas de concreto e argamassas	51,84	58,02	45,36
Mat. Cerâmicos (Tijolos e Telhas)	1,34	1,05	0,77
Mat. Cerâmicos (Revestimentos)	0,21	0,18	0,25
Solo	44,75	39,01	52,71
Betume	0,80	0,82	0,47
Materiais rochosos	0,68	0,69	0,30
Madeira	0,01	0,01	0,01
Plástico	0,01	0,01	<0,01
Borracha	-	-	-
Vidro	0,03	0,04	0,02
Gesso	0,34	0,14	0,09
Papel/Papelão	0,01	0,01	0,01
Metal	-	0,04	<0,01
Tecido	<0,01	<0,01	<0,01
Isopor	<0,01	-	-
Espuma	<0,01	-	<0,01
Carvão	<0,01	-	-
Casca de Tinta	-	-	-
Outros	-	-	-

### 4.3.5 pH

Os resultados de pH evidenciaram o caráter alcalino das amostras de RCD-R da 2ª exumação. Os resultados mostraram valores de pH próximos a 10, havendo, portanto, alterações dentro do esperado para esses RCD-R. A Tabela 4.13 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de pH.

Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios de pH do RCD-R de preenchimento. (Próprio autor).

Amostra	Água Destilada
Seco	10,43
Chuva	9,90
Inundado	10,17

## **4.4 ANÁLISES DE PROPRIEDADES E PARÂMETROS DOS LÍQUIDOS EXTRAÍDOS DOS EXPERIMENTOS DE CAMPO**

São apresentados a seguir os valores de potencial hidrogeniônico (pH) monitorados durante o período experimental. Os valores de pH foram confrontados com os dados de temperatura local, fazendo-se distinções entre os tanques analisados e os pontos de coleta. São apresentados também análises para alguns parâmetros dos líquidos extraídos previamente cada exumação.

### **4.4.1 Análises de pH, temperatura e condições de saturação no decorrer do experimento de campo**

A análise do pH revelou que a água do reservatório (utilizada para manter a saturação do tanque inundado durante o período experimental) apresentou valores de pH entre 7,29 e 8,36 durante todo o período de monitoramento (180 dias). O monitoramento do pH nos tanques experimentais mostrou valores de pH (média dos tubos de coleta) entre 10,65 e 12,34. Os valores de pH dos tanques chuva e inundado (com água do reservatório), mantiveram valores de pH bem próximos até o dia 120 (Figura 4.6). A partir do dia 120, observou-se uma variação de valores, mas que não ultrapassou uma diferença de 0,87 considerando o mesmo dia nesta análise. A análise da temperatura no experimento revelou que a partir do dia 120 houve uma menor variação de valores médios, sendo de 23,9 °C a 26,8 °C, dado que ao longo de todo o experimento, as temperaturas médias medidas foram de 23,7 °C a 30,1 °C (Figura 4.7). De modo geral, as temperaturas médias dos experimentos (26,0°C no tanque inundado, e 26,1°C no tanque chuva), foi menor que a temperatura do ar local (28,7 °C) quando analisados somente as médias das 10:00h às 17:00h dos dias de coleta.

Figura 4.6 – Resultados dos ensaios de pH nos tanques experimentais. (Próprio autor).

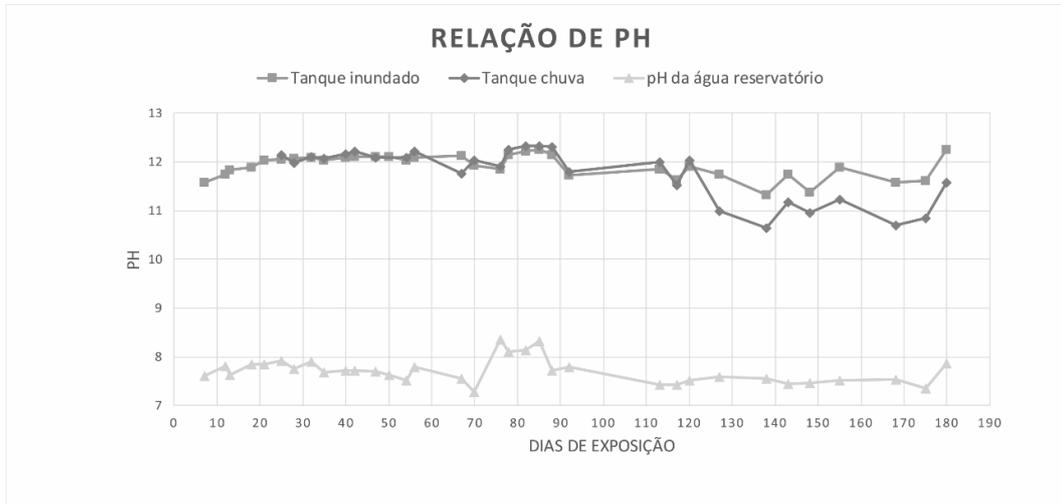
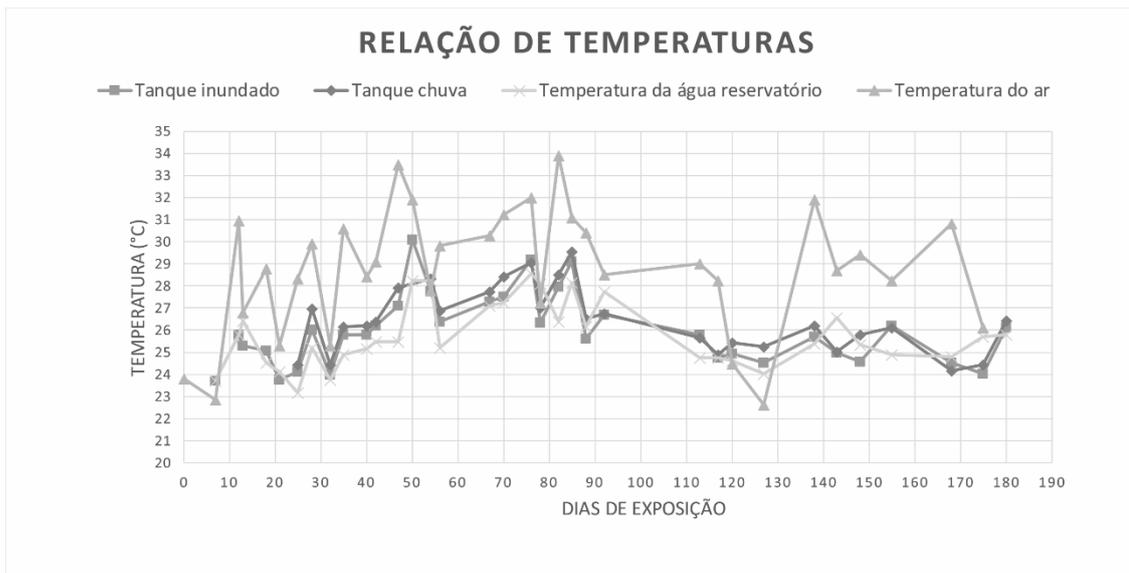


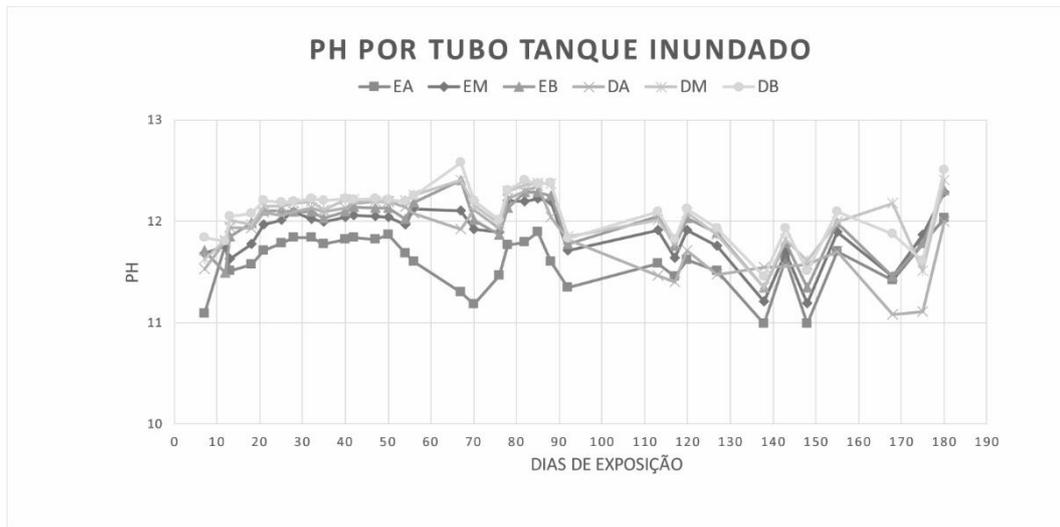
Figura 4.7 – Resultados dos valores de temperaturas nos tanques experimentais e do ar. (Próprio autor).



#### 4.4.2 Análise das variações de pH por diferentes alturas de coleta

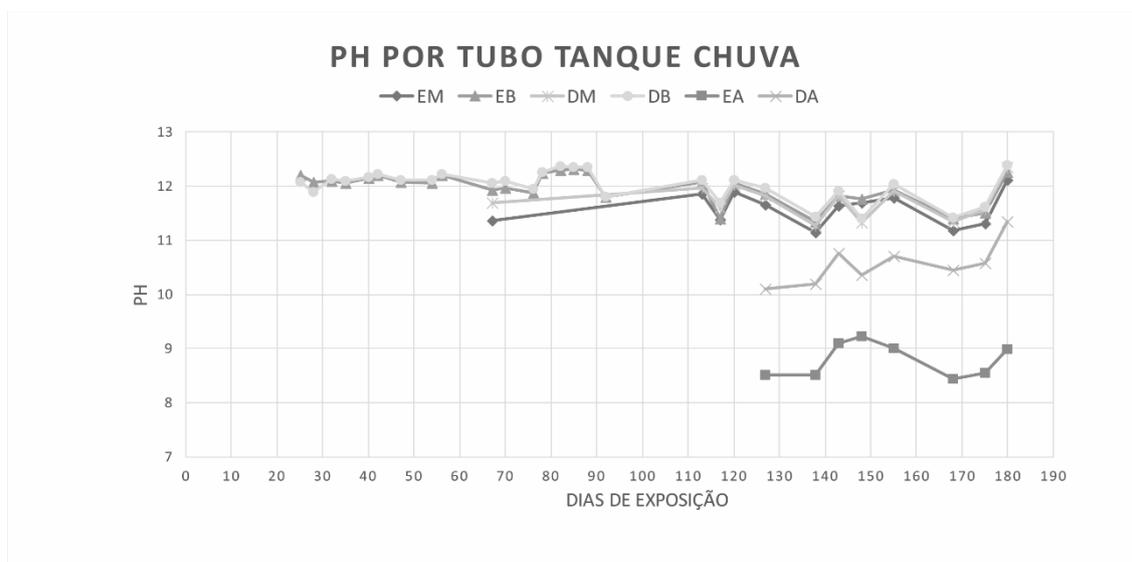
Os resultados mostraram que no tanque inundado o tubo esquerdo alto (EA) apresentou os menores valores de pH ao longo do tempo. No entanto, os valores médios de pH dos lados direito (pH=12,01) e esquerdo (pH=11,82) mantiveram praticamente iguais. A Figura 4.8 apresenta os valores de pH para os diferentes tubos de coleta.

Figura 4.8 – Resultados dos valores de pH do tanque inundado para diferentes alturas de coleta. (Próprio autor).



O monitoramento do pH no tanque chuva revelou que os tubos de coleta mais altos (810 mm acima do fundo do tanque) somente permitiu a coleta de água a partir do 127º dia. Os tubos de coleta mais altos (EA e DA) mostraram-se valores de pH inferiores aos observados nos tubos mais baixos (270 mm acima do fundo do tanque) e da altura média (540 mm acima do fundo do tanque). Em relação às alturas dos tubos, foram observados os seguintes valores médios: 9,68, para os tubos mais altos; 11,65, para os tubos médios; e 11,99, para os tubos mais baixos. A Figura 4.9 apresenta os valores de pH obtidos no monitoramento do tanque chuva.

Figura 4.9 – Resultados dos valores de pH do tanque chuva para diferentes alturas de coleta. (Próprio autor).



### 4.4.3 Análise dos parâmetros dos líquidos

O material lixiviado de cada exumação no momento em que o tanque foi esvaziado, para a retirada das geogrelhas, foi analisado em laboratório de análise de águas, e seus resultados são apresentados na Tabela 4.14.

Observou-se que os valores de alcalinidade ( $\text{CaCO}_3$  mg/L) foram próximos aos encontrados por Townsend, Jang e Thurn (1999) no período de 10 a 20 dias no lisímetro saturado. As concentrações de cloreto ficaram acima do verificado pelo autor, enquanto as concentrações de fluoreto foram muito próximas. Se analisados com a norma NBR 10.004 (2004) é possível, para o Anexo G, ensaio de solubilização, verificar que

- . para o cloreto (limite de 250,0 mg/L) e o fluoreto (limite de 1,5 mg/L): as amostras não ultrapassaram os limites;
- . para o alumínio (limite de 0,2 mg/L): todas as amostras ultrapassaram o limite máximo; e
- . para o ferro (limite de 0,3 mg/L): as amostras ultrapassaram o limite máximo na 1ª exumação.

No entanto, apesar dessa constatação, deve-se ressaltar que o experimento de campo não se trata de um ensaio de caracterização do RCD-R em ‘inerte’ ou ‘não inerte’. Contudo, chama-se a atenção para o fato dos RCD-R nas condições de ensaio terem apresentado resultados que os classificaria como resíduos não inertes.

Tabela 4.14 – Resultados dos metais analisados para cada tanque no momento da exumação. (Próprio autor).

Análises	Amostras dos tanques			
	TI - 1EX	TC - 1EX	TI - 2EX	TC - 2EX
Alcalinidade ( $\text{CaCO}_3$ mg/L)	630,88	727,50	480,13	419,25
Cloreto (mg/L)	81,07	152,23	161,76	153,02
Fluoreto (mg/L)	0,81	1,47	0,89	0,77
Alumínio (mg/L)	0,28	0,26	0,32	0,36
Ferro (mg/L)	0,32	0,50	0,15	0,16

## **4.5 ENSAIOS DE MEV**

### **4.5.1 Tanque chuva (TC)**

A análise das imagens das amostras virgens e danificadas, empregadas no tanque de chuva (TC), revelou que o processo de simulação de danos (lançamento do RCD-R de uma altura de 2,0 m) não comprometeu significativamente a integridade física dos elementos longitudinais das geogrelhas (Figuras 4,10; 4.11 e 4.12; itens a, d, g e j). Contudo, é possível observar a exposição de fibras mesmos nas amostras virgens (não submetidas à simulação de danos)..

Contudo, as amostras da 1ª exumação (90 dias) e da 2ª exumação (180 dias) revelaram uma maior exposição de fibras – em relação às amostras virgens – e uma impregnação de materiais (RCD-R) de maneira bastante íntima, como uma maior alteração sendo observada entre a 1ª e a 2ª exumação. Embora a avaliação puramente visual não possibilite fazer maiores avaliações, ela sugere uma alteração de textura do material de cobertura das amostras exumadas (Figura 4.11).

Figura 4.10 – Imagens de MEV com aumento de 50 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor).

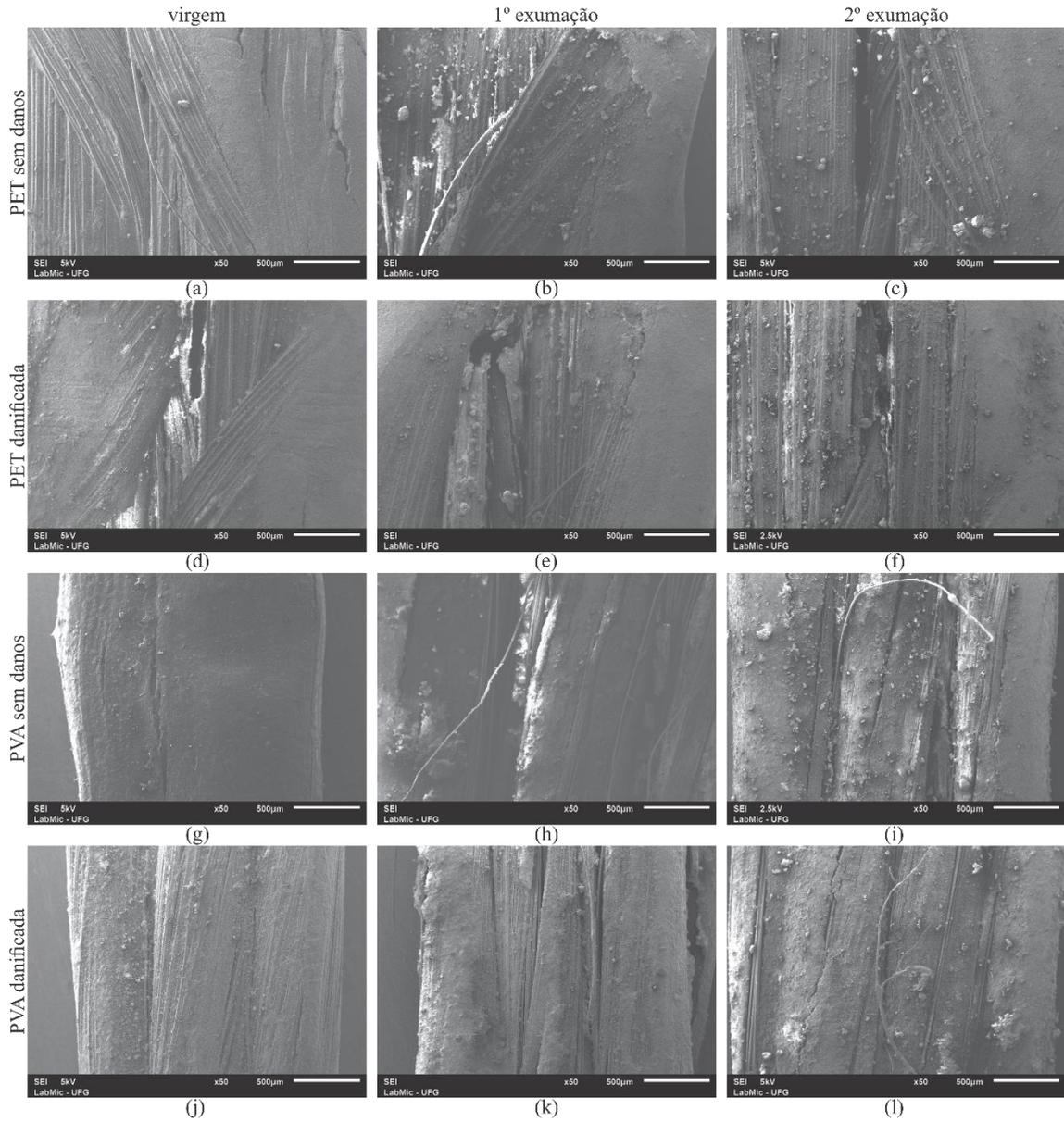


Figura 4.11 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor).

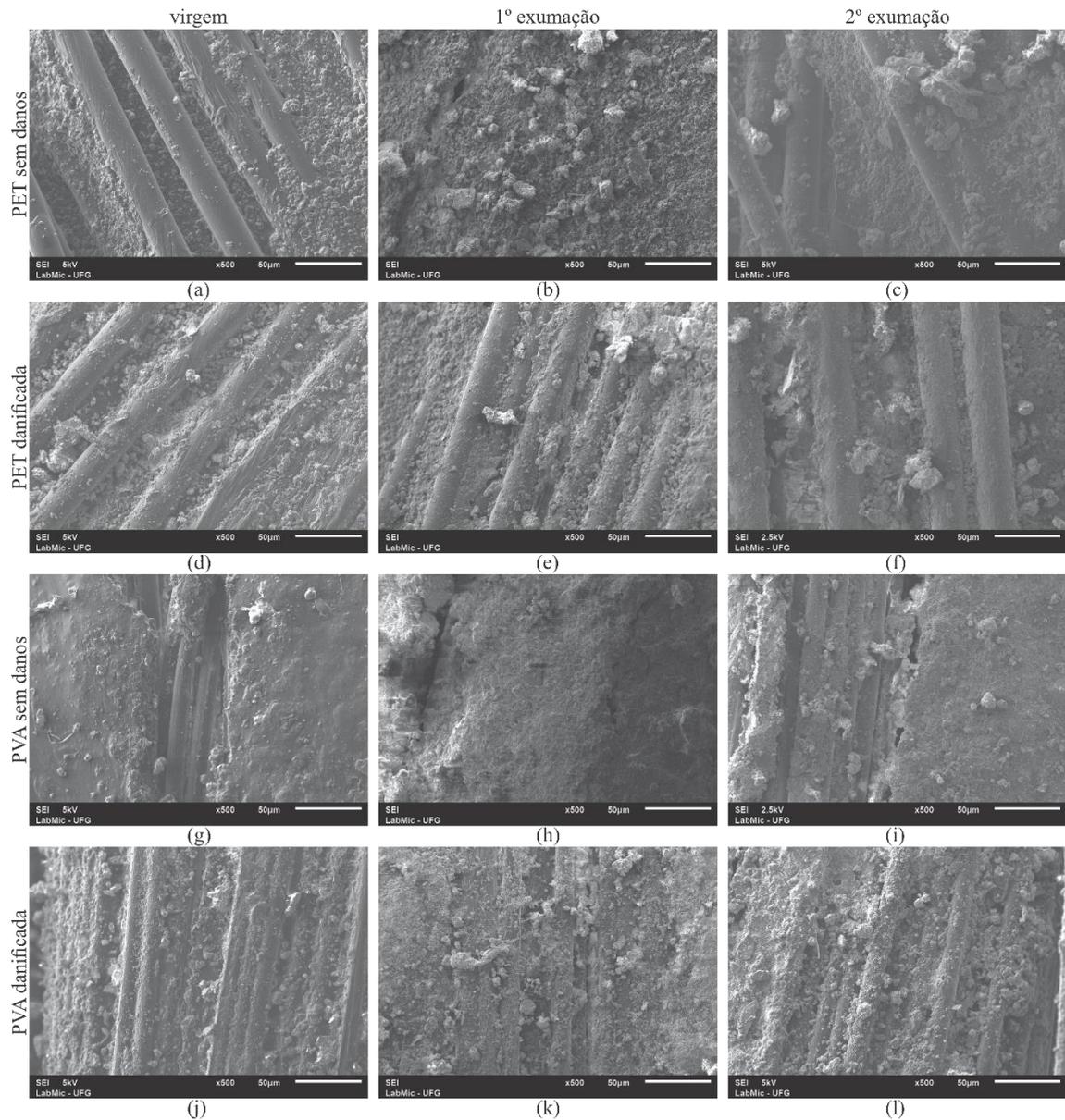
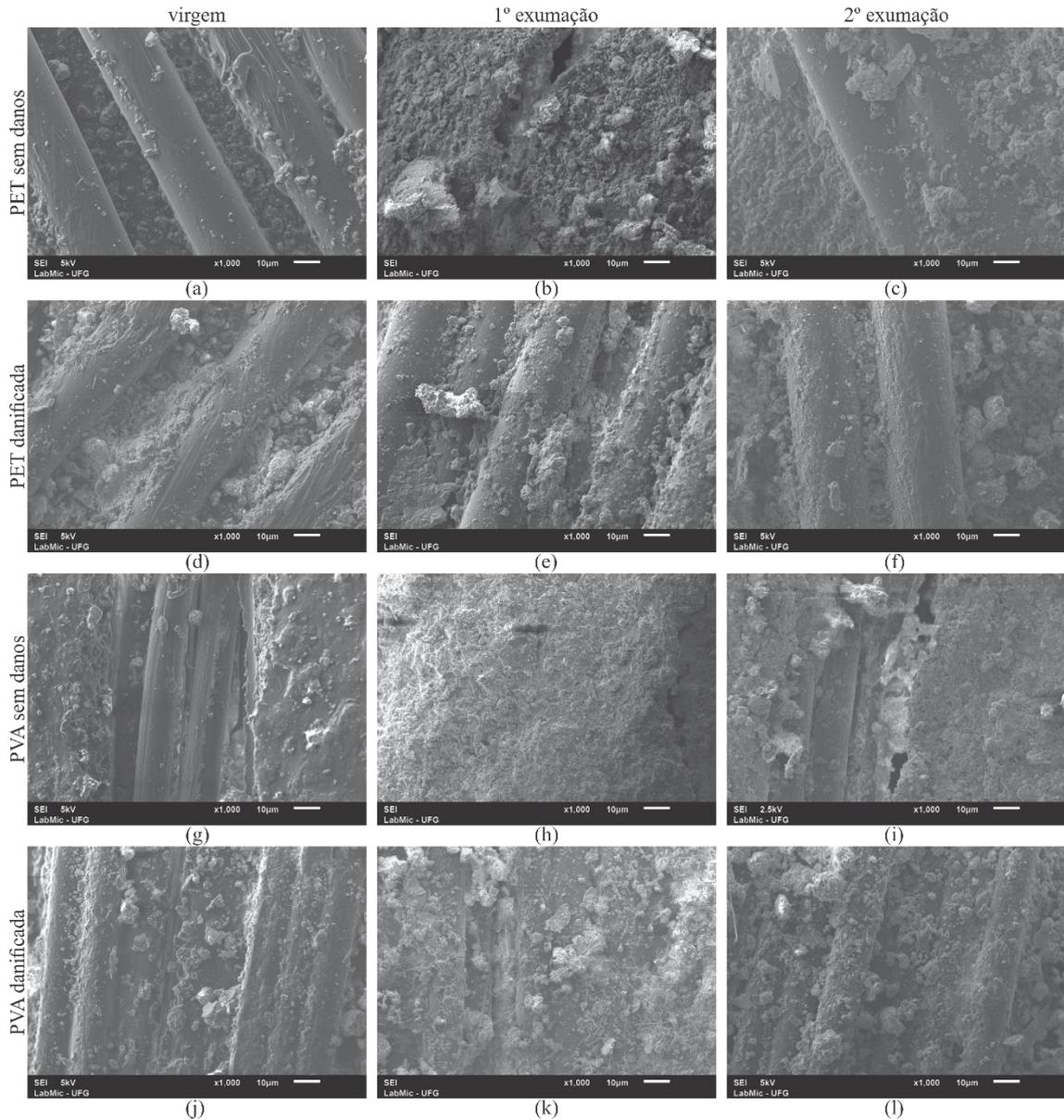


Figura 4.12 – Imagens de MEV com aumento de 1000 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor).



#### 4.5.2 Tanque inundado (TI)

A análise das imagens obtidas das amostras empregadas no tanque inundado (TI) não sugere uma maior degradação das geogrelhas entre o início do experimento, a 1ª exumação (90 dias)

e a 2ª exumação (180 dias). Dessa forma, com base nas imagens, pode-se afirmar que a inundação não representou uma condição mais agressiva às geogrelhas. As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 ilustram a comparação entre as imagens de MEV realizadas no TI com um aumento de 50, 500 e 1000 vezes, respectivamente.

Figura 4.13 – Imagens de MEV com aumento de 50 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA.

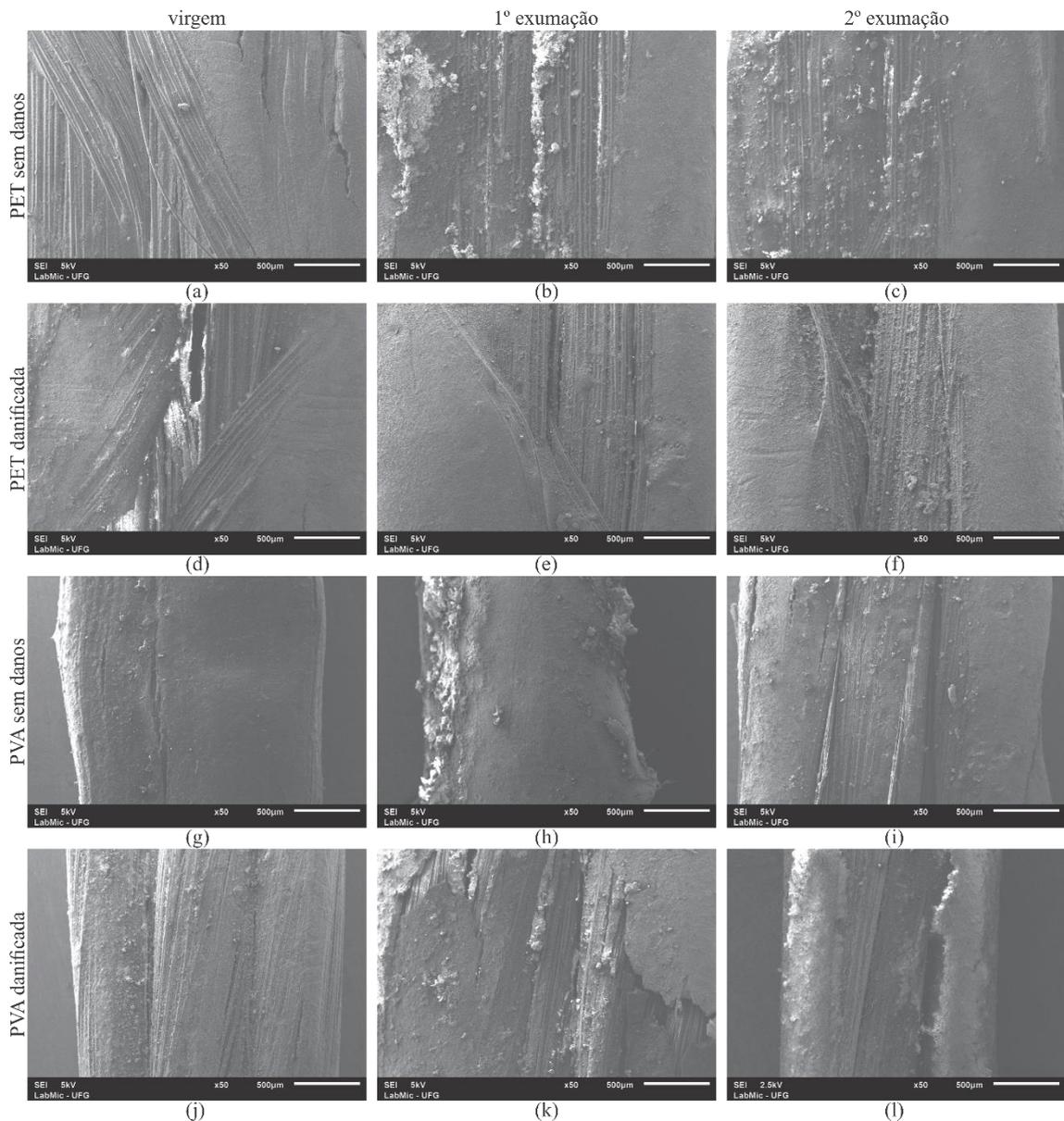


Figura 4.14 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA.

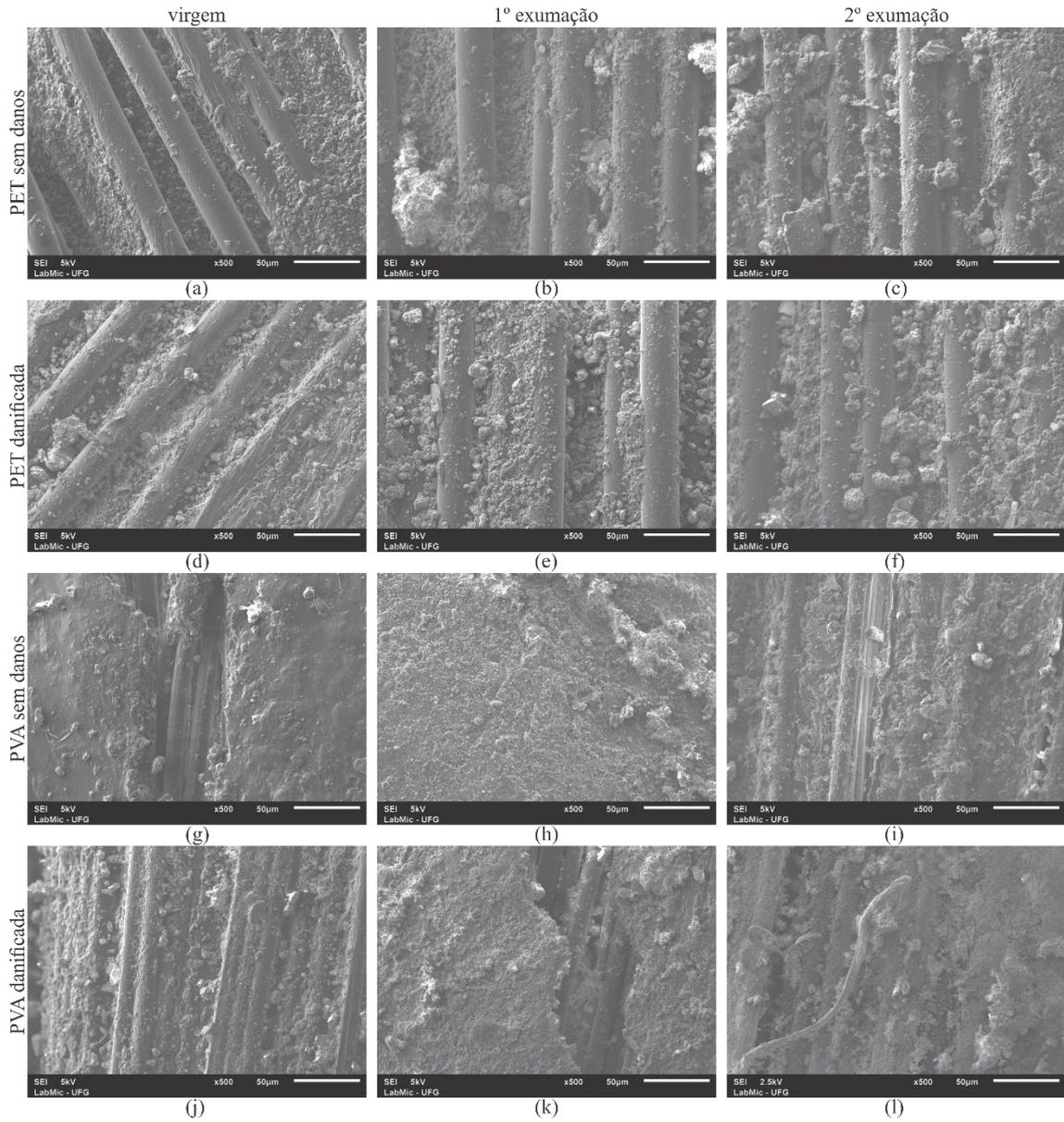
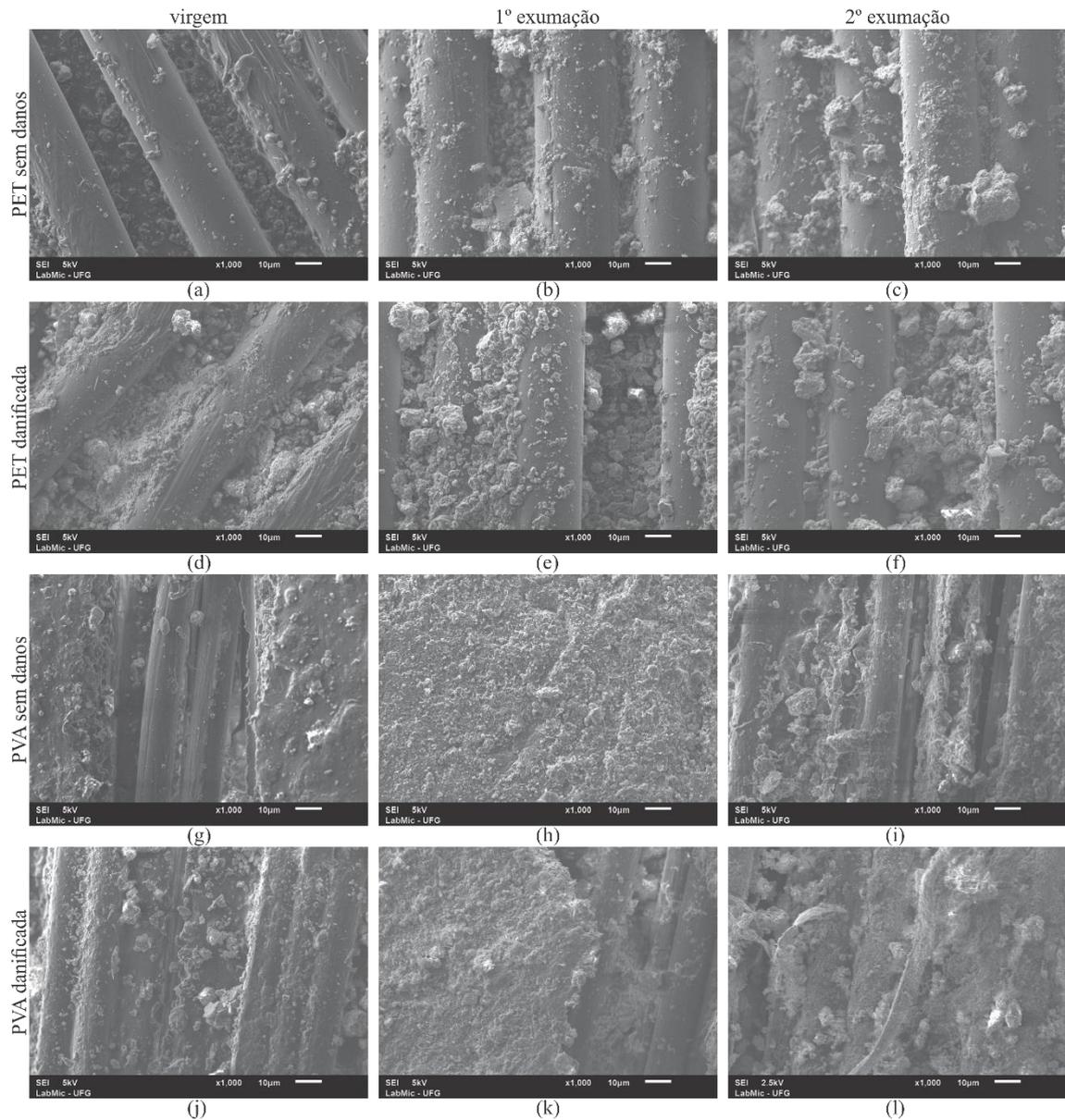


Figura 4.15 – Imagens de MEV com aumento de 1000 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA.



### **4.5.3 Tanque seco (TS)**

A análise das imagens do tanque seco (TS) revelou que esse tanque foi o que apresentou menor quantidade de materiais provenientes do RCD-R aderidos às geogrelhas. No entanto, as imagens apresentadas nas Figuras 4.17 (e) e 4.18 (e) mostrou uma fissura atípica com uma abertura (um pouco menor que o diâmetro da fibra de PET) localizada na proteção da geogrelha. Essas imagens parece ser um indicativo do início do processo de remoção da camada de proteção empregada na fabricação da geogrelha, o que vai além da investigação deste estudo. Observou-se o aumento de dano entre as amostras de PVA sem danos e PVA danificada, especificamente na 1ª exumação, como comparado na Figura 4.16 (h) e (k).

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 ilustram a comparação entre as imagens de MEV realizadas no TS para um aumento de 50, 500 e 1000 vezes, respectivamente.

Figura 4.16 – Imagens de MEV com aumento de 50 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor).

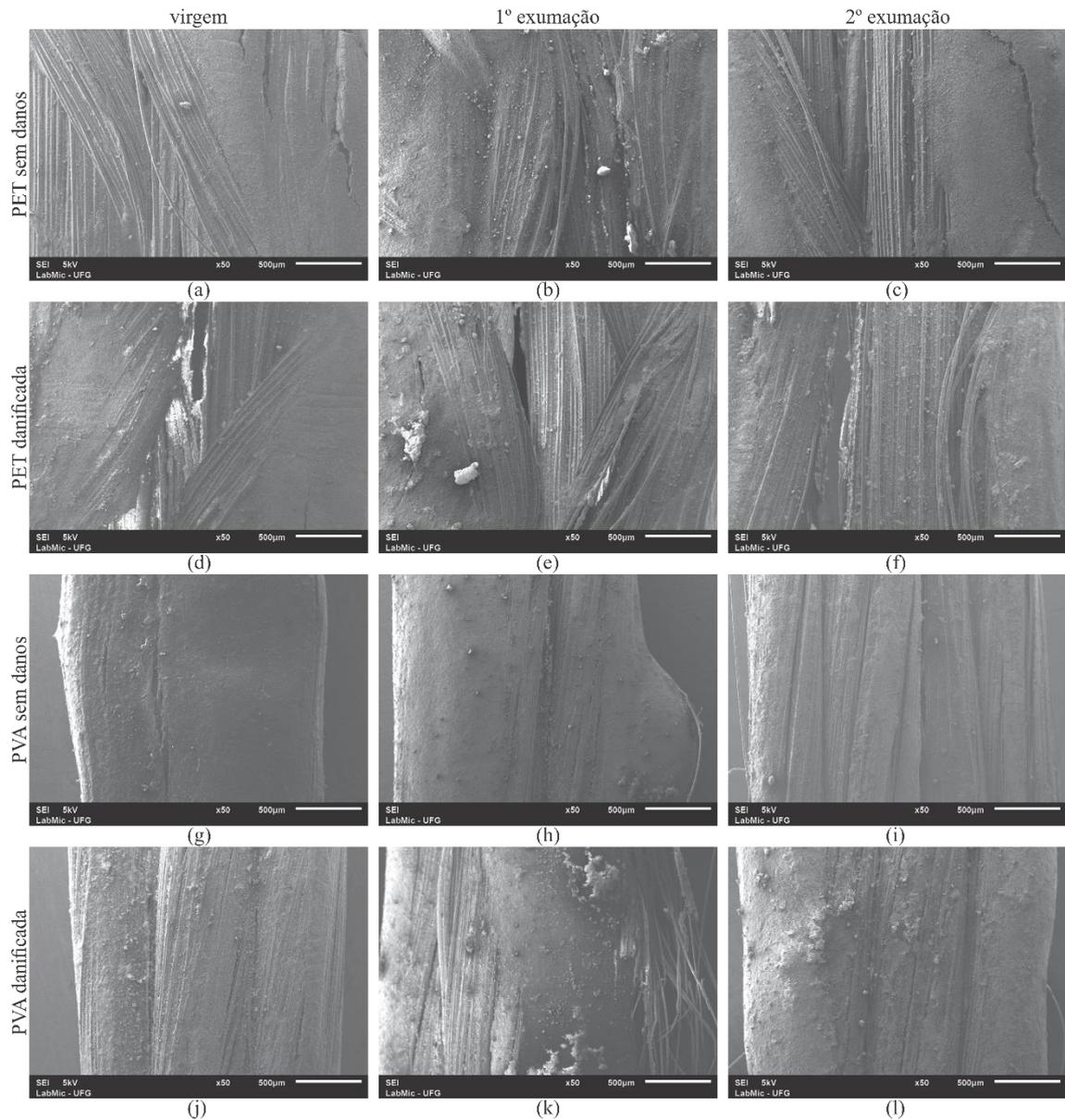


Figura 4.17 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor).

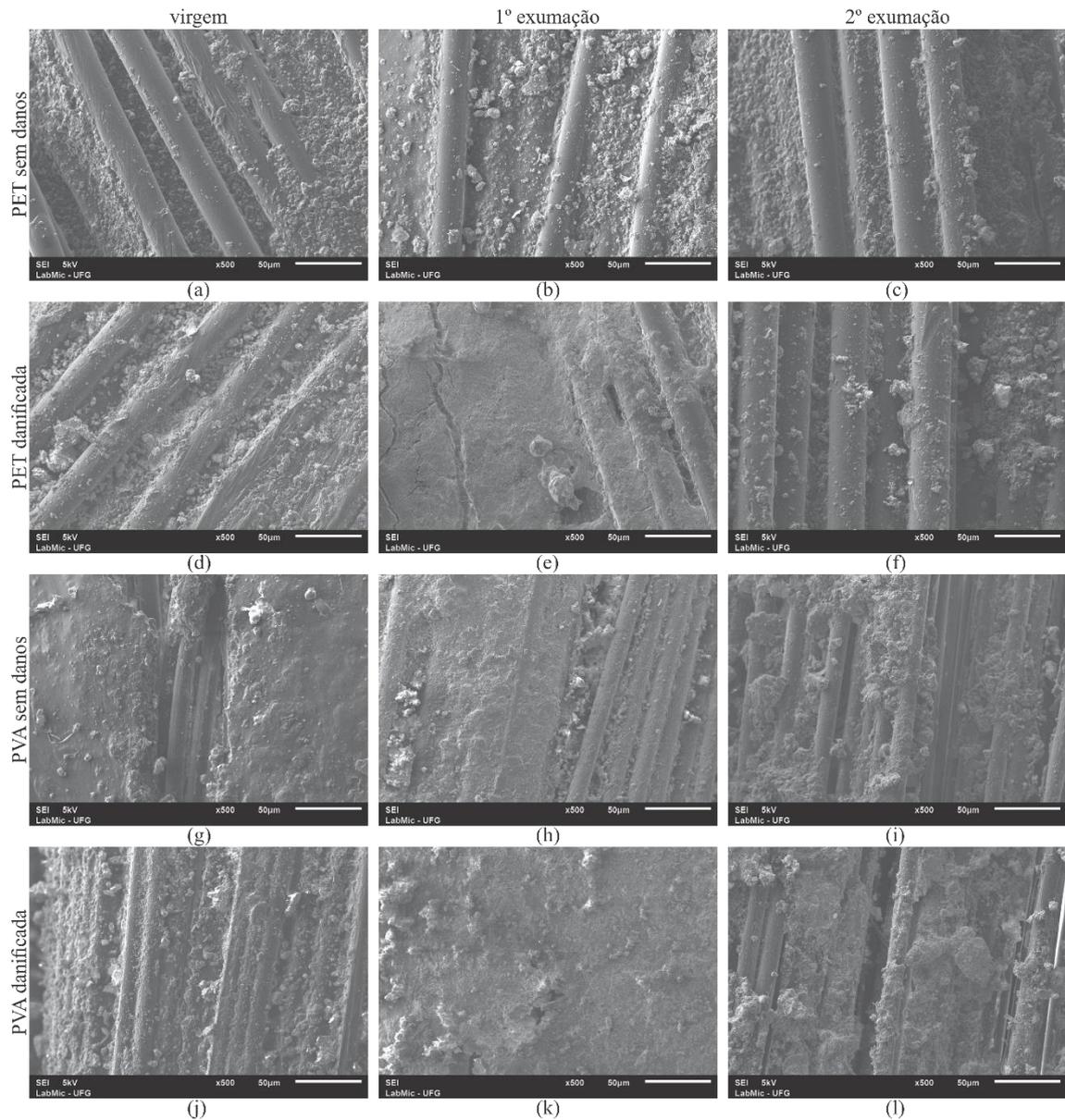
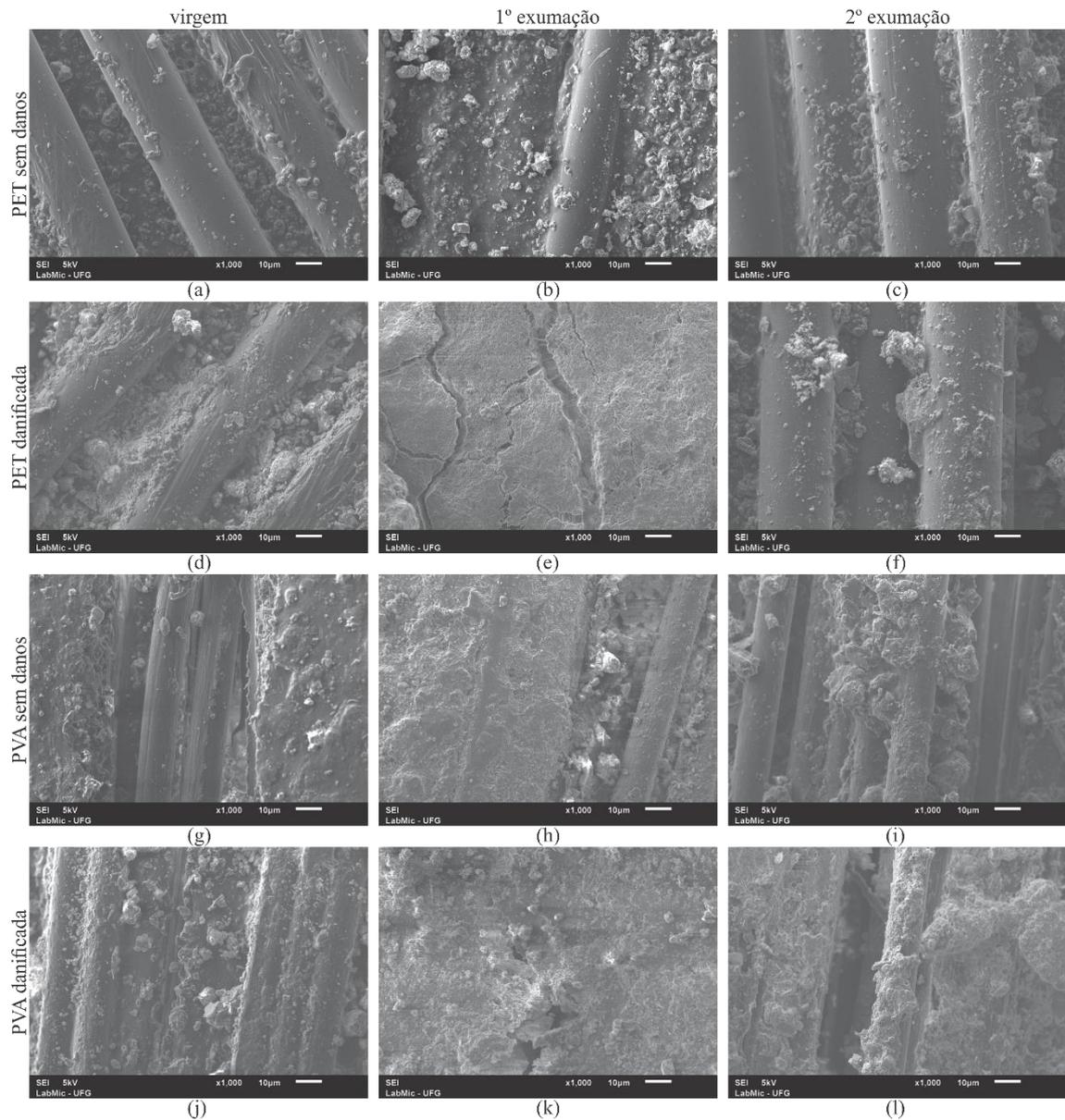


Figura 4.18 – Imagens de MEV com aumento de 1000 vezes do tanque chuva. Legenda: (a) virgem sem danos PET; (b) 1º exumação sem danos PET; (c) 2º exumação sem danos PET; (d) virgem danificada PET; (e) 1º exumação danificada PET; (f) 2º exumação danificada PET; (g) virgem sem danos PVA; (h) 1º exumação sem danos PVA; (i) 2º exumação sem danos PVA; (j) virgem danificada PVA; (k) 1º exumação danificada PVA; (l) 2º exumação danificada PVA. (Próprio autor).



## **4.6 ENSAIOS DE EDX**

### **4.6.1 Geogrelhas virgens**

A análise dos ensaios de EDX realizados nas geogrelhas virgens e virgens danificadas (de PET e PVA) mostraram que as fibras poliméricas expostas somente produzem picos nos elementos de carbono e oxigênio (pontos 2, 3, 4, 8, 9 e 11), o que faz sentido quando se confronta com a fórmula molecular do PET ( $C_{10}H_8O_4$ )<sub>n</sub> e do PVA ( $C_4H_6O_2$ )<sub>n</sub>. Não foi possível determinar qual o material constituinte da camada de proteção das geogrelhas. No entanto, foi possível notar que o cálcio (Ca) aparenta fazer parte da composição química de proteção das geogrelhas de PET e de PVA, conforme se nota nos pontos (1, 5, 6, 7 e 12). Foi possível notar que, em algumas geogrelhas, houve a detecção de alumínio e silício, conforme ilustra os pontos (5, 6, 7, 10 e 12), o que, pode ser decorrente da exposição das geogrelhas ao ambiente e a tais elementos durante todo o processo de preparação das amostras (transporte dos rolos, corte de amostras e/ou contato com outras superfícies). A Figura 4.19 ilustra a morfologia e os pontos analisados e a Figura 4.20 ilustra os espectros dos respectivos pontos analisados.

Figura 4.19 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras virgens contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor).

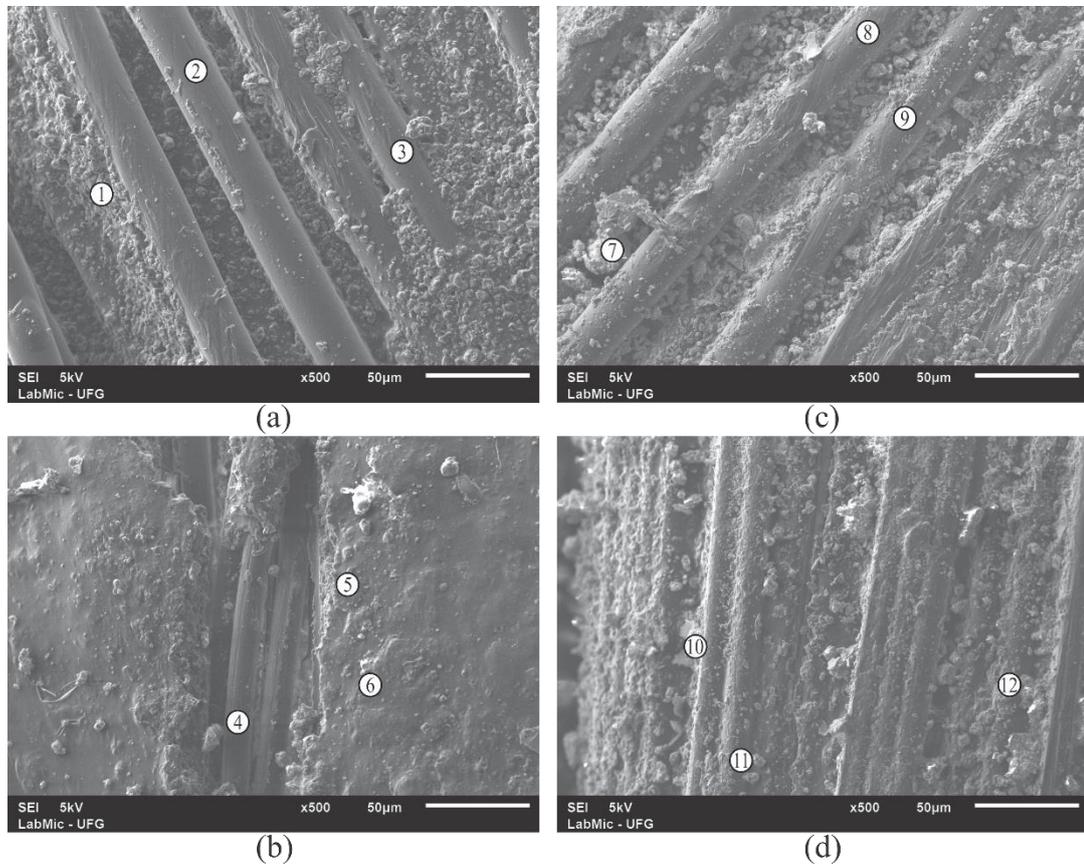
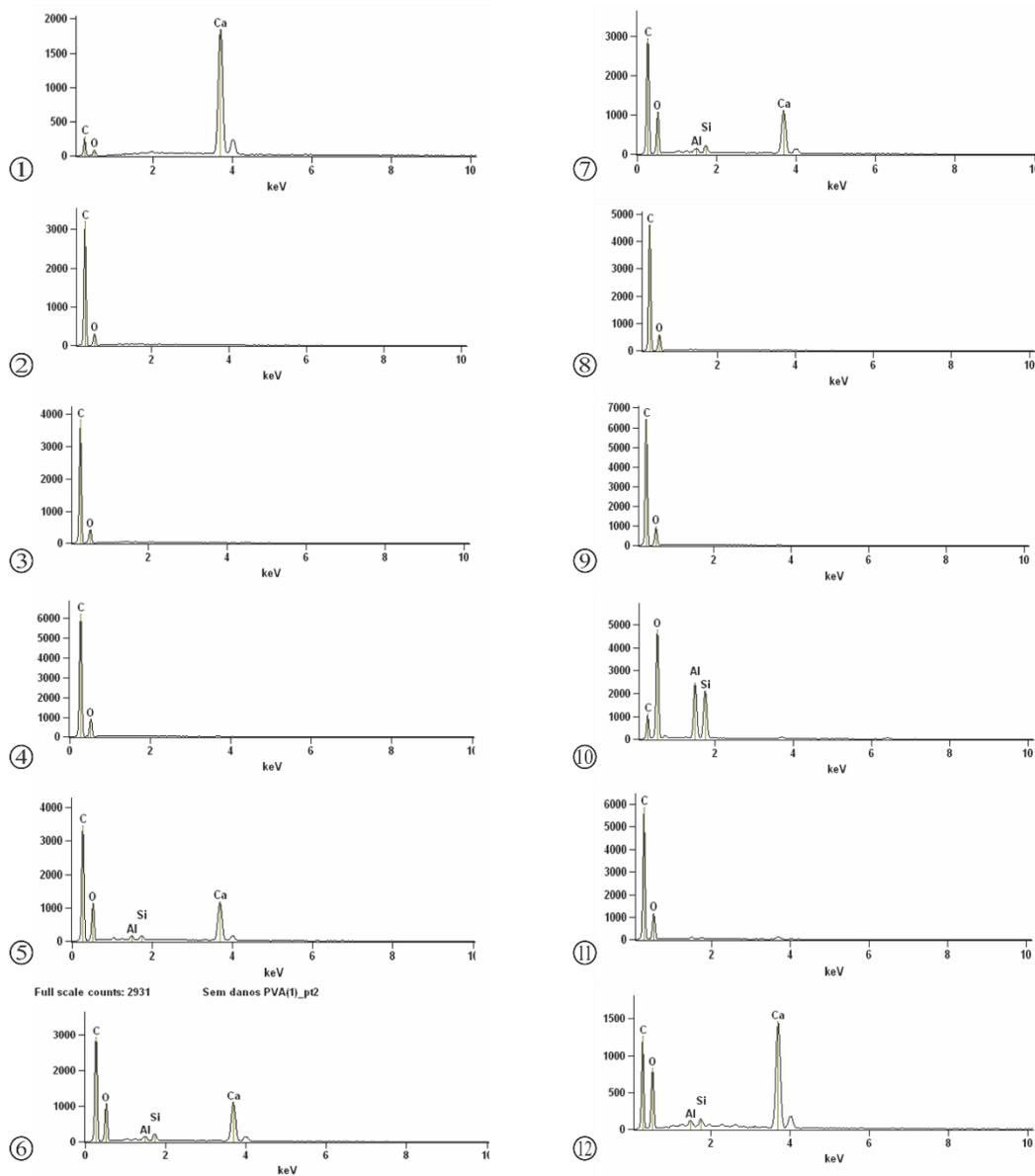


Figura 4.20 – Gráficos das análises de EDX das amostras virgens contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor).



#### 4.6.2 Geogrelhas da primeira exumação

A análise dos resultados de EDX da 1ª exumação (90 dias) dos tanques experimentais revelaram uma grande quantidade de elementos em relação aos resultados encontrados nas

amostras virgens, o que está associado diretamente ao contato com o RCD-R durante o experimento.

Avaliando os ensaios de EDX realizados nas amostras virgens, os ensaios nas amostras do tanque chuva (pontos 13 a 24) mostraram os seguintes elementos aderidos às geogrelhas: magnésio, alumínio, silício, ferro, potássio, cálcio, e enxofre. Nesse contexto, vale ressaltar que o solo laterítico da região é capaz de explicar a presença desses diferentes materiais, dado que é bem provável de encontrar argilominerais nesse solo, como a caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), a gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (goethita e gibbsita).

Porém, é preciso levar em consideração que parte desses elementos podem ter lixiviado de materiais cerâmicos (principalmente silício e alumínio), cimentícios (cálcio, alumínio, ferro, magnésio, enxofre, silício, potássio e sódio), como mostrou Glass, Page e Short (1991). Tais elementos também pode ser um produto da própria solubilização do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) presente no RCD-R, o que pode explicar a formação de agregações verificadas pelas imagens do MEV (melhor identificáveis nos aumentos de 1000 vezes nas Figuras 4.12; 4.15 e 4.18). Outro ponto relevante é a consideração de que o enxofre (S) pode se apresentar tanto em forma de cristais quanto como agregações na forma de sulfatos. A Figura 4.21 ilustra a morfologia e os pontos analisados e a Figura 4.22 ilustra os espectros dos respectivos pontos analisados.

Figura 4.21 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras do tanque chuva da 1ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor).

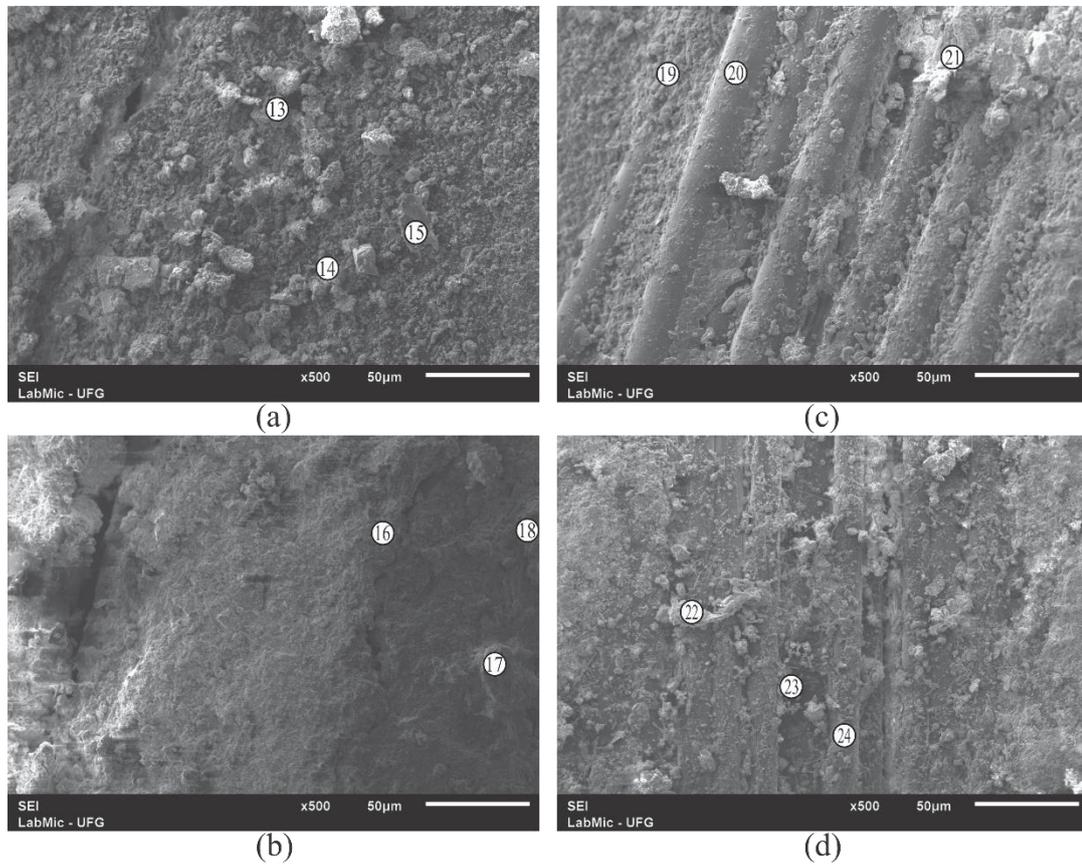
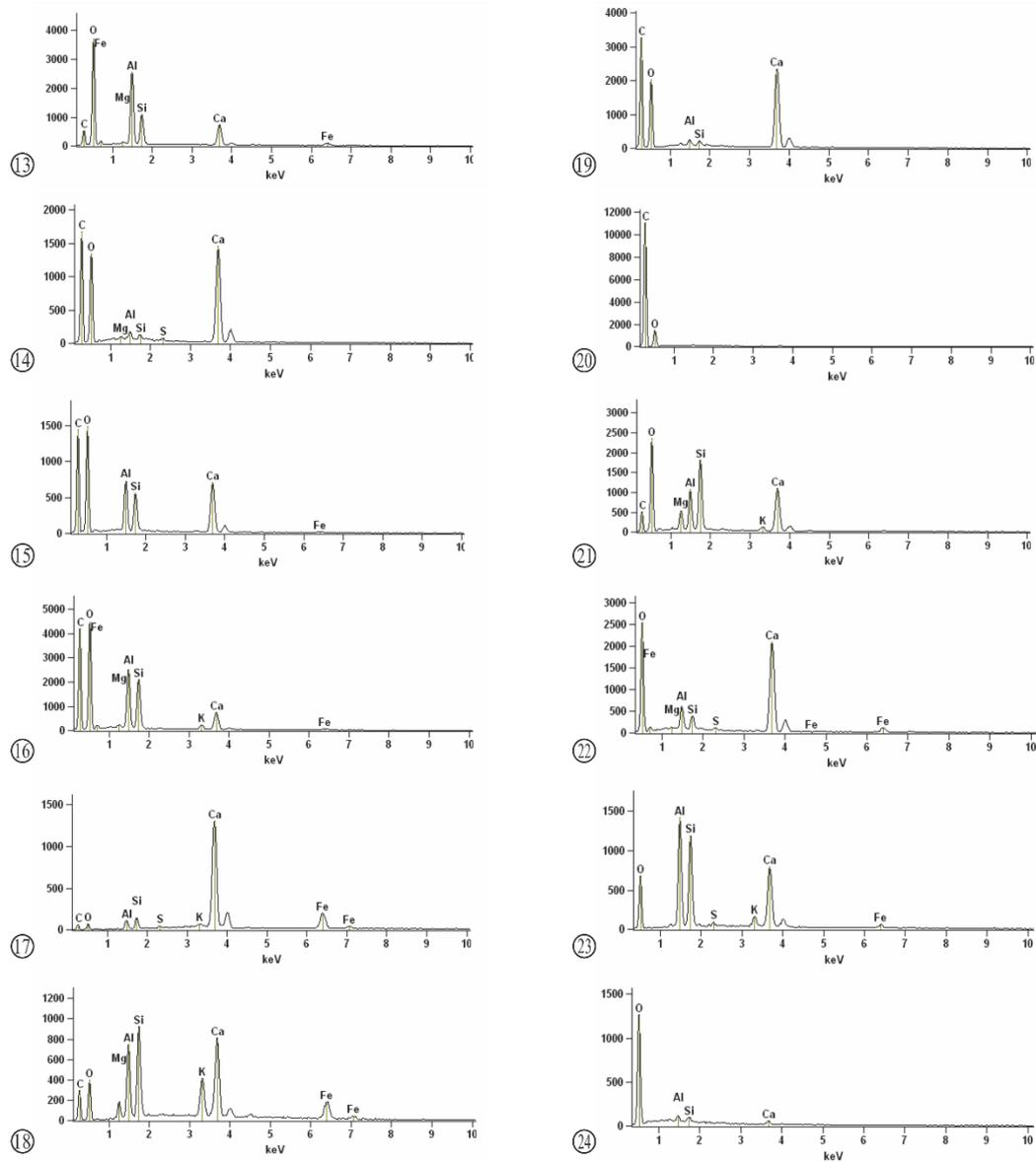


Figura 4.22 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque chuva da 1ª exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor).



A análise dos resultados no tanque inundado evidenciaram os mesmos elementos químicos encontrados no tanque chuva, havendo apenas diferença nos picos. O ponto 31 apresentou um elemento com uma morfologia atípica do visualizado em outras imagens, porém não foi possível realizar sua precisa identificação com o EDX, este elemento mostrou picos em cálcio (Ca), alumínio (Al) e silício (Si). A Figura 4.23 ilustra a morfologia e os pontos analisados e a Figura 4.24 ilustra os espectros dos respectivos pontos analisados.

Figura 4.23 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque inundado da 1ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de

instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor).

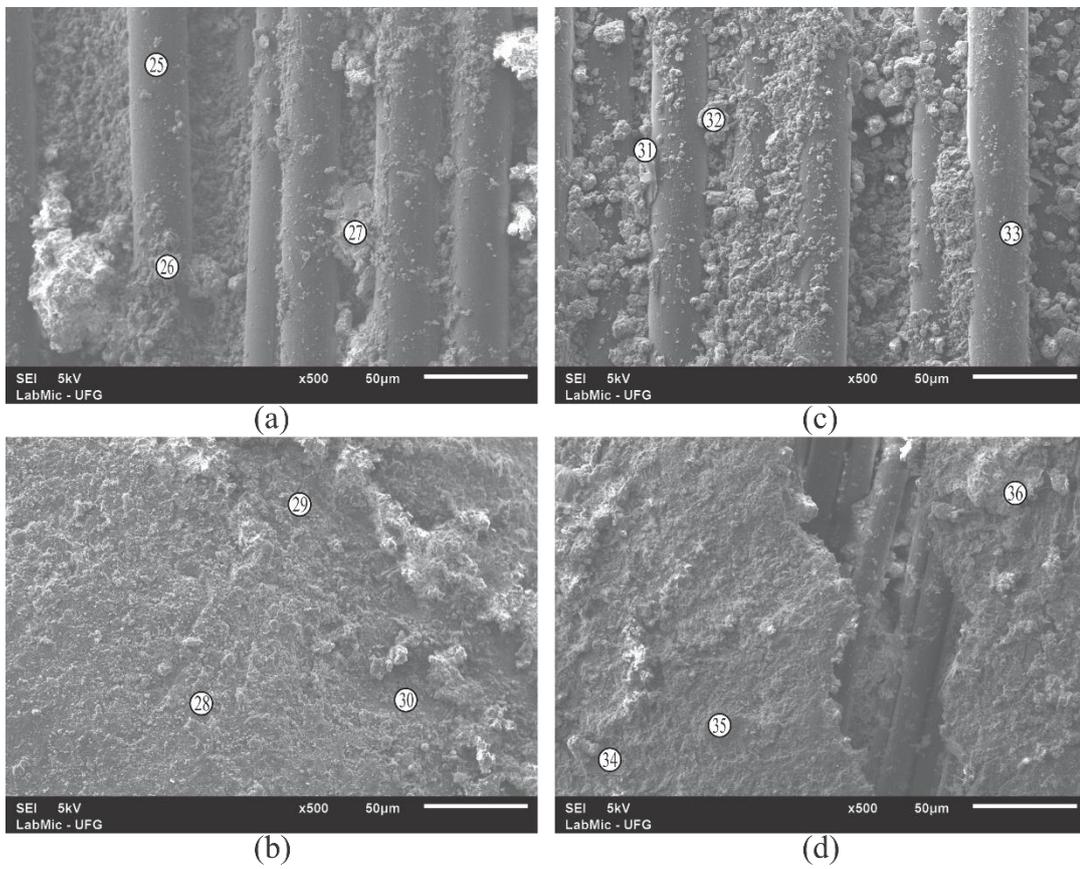
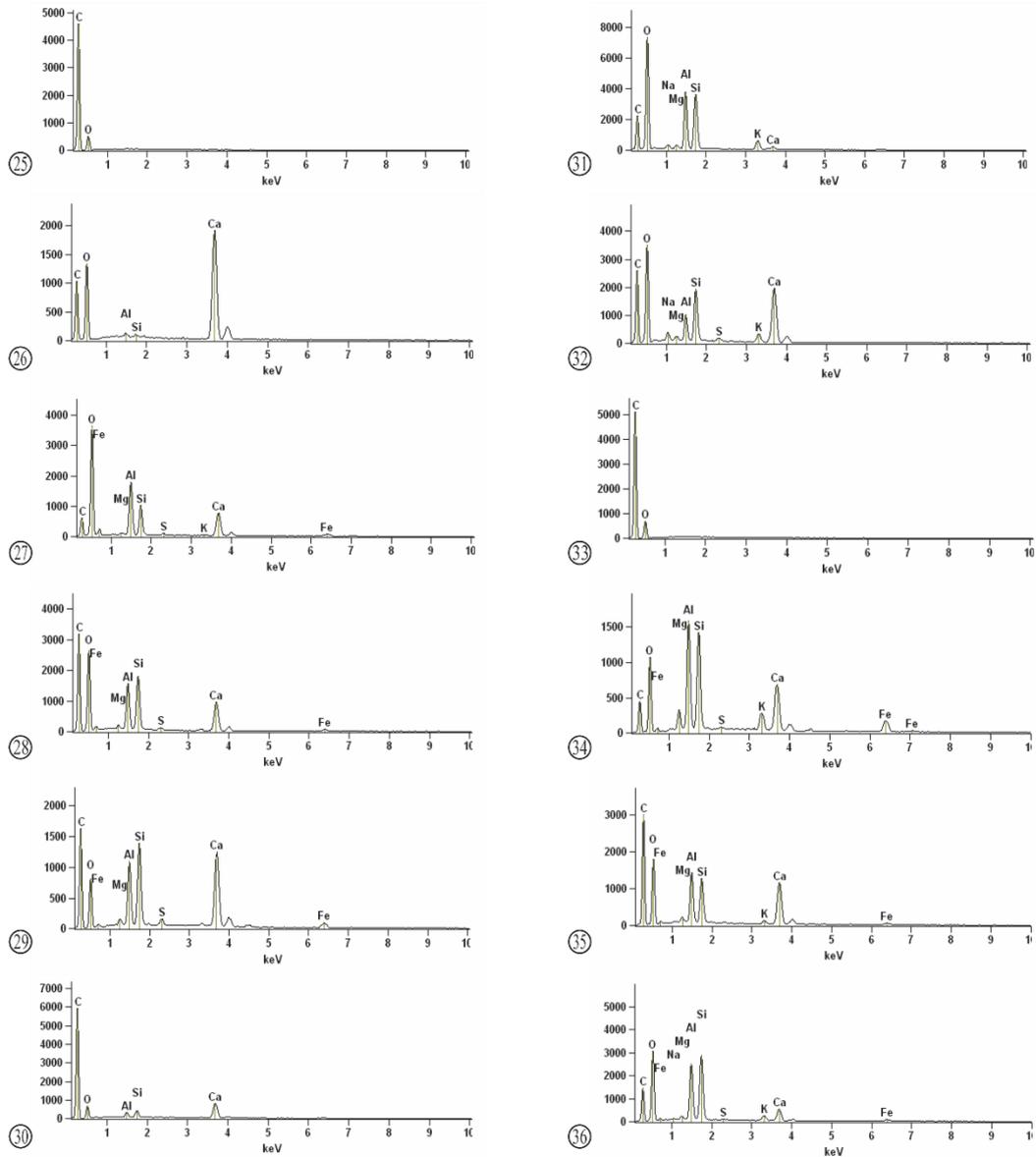


Figura 4.24 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque inundado da 1ª exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor).



Observou-se que os resultados no tanque seco mostraram os mesmos resultados já analisados nas amostras virgens e nos tanques chuva e inundado. No entanto, o ponto 41 revelou o aparecimento de titânio, no entanto, o baixo pico pode indicar imprecisão da máquina. A Figura 4.25 ilustra a morfologia e os pontos analisados e a Figura 4.26 ilustra os espectros dos respectivos pontos analisados.

Figura 4.25 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque seco da 1ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor).

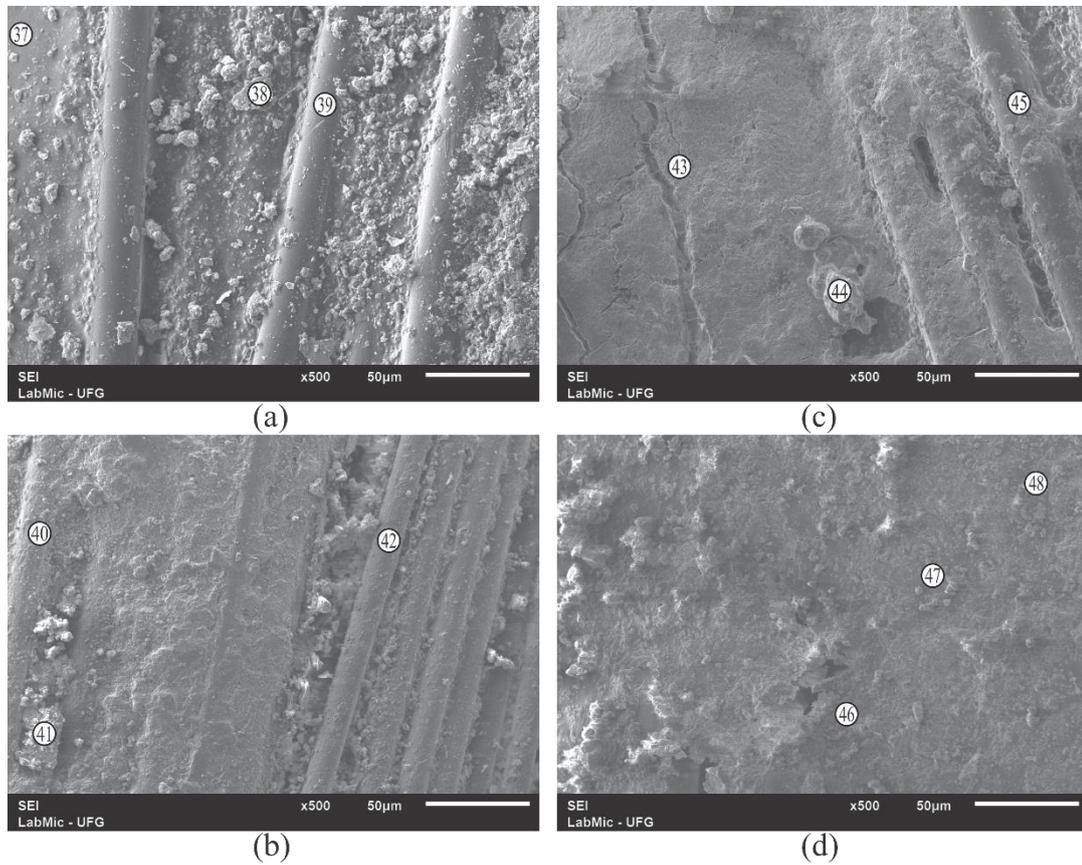
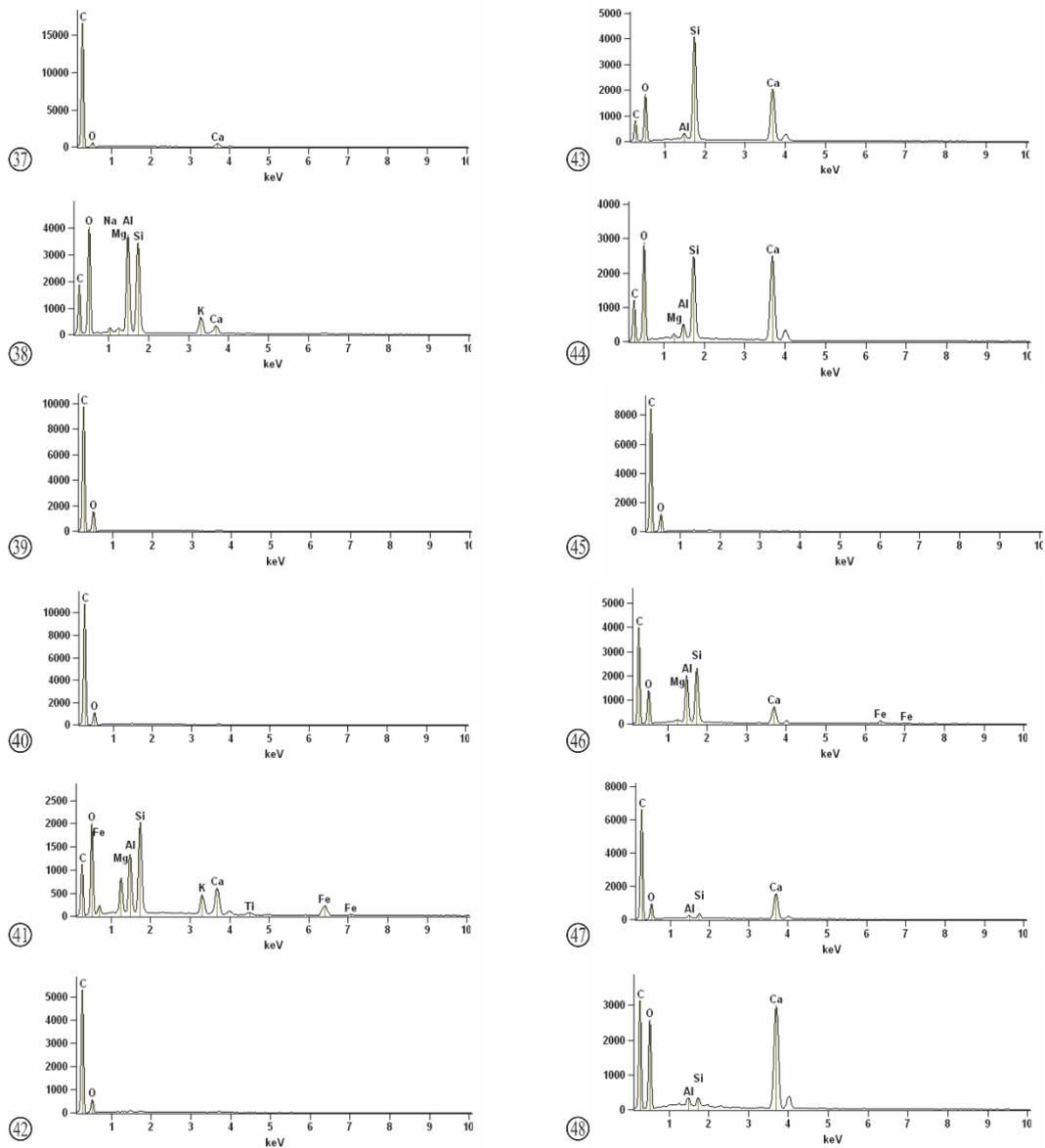


Figura 4.26 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque seco da 1ª exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor).



### 4.6.3 Geogrelhas da segunda exumação

A avaliação dos resultados no tanque chuva da 2ª exumação, em relação aos elementos encontrados na 1ª exumação, evidenciaram o surgimento apenas do elemento cloro (Cl) – visualizado no ponto 56. Embora a morfologia tenha se mostrado insuficiente para determinar a sua composição, o ensaio de EDX e morfologia juntos revelaram esse elemento formou uma

agregação, na qual pode conter gipsita, caulinita, sendo o cloro um elemento que pode ter sido carregado da atmosfera pelas chuvas para dentro do tanque ou advindo de sais durante provenientes do processo de exumação. A presença de sódio (Na), potássio (K) e cloro (Cl), conjuntamente no mesmo ponto, pode indicar que esses elementos podem ser de uma agregação de sal – cloreto de sódio (NaCl) ou cloreto de potássio (KCl) – conjuntamente com um ou mais tipos de argilominerais. A Figura 4.27 ilustra a morfologia e os pontos analisados e a Figura 4.28 ilustra os espectros dos respectivos pontos analisados.

Figura 4.27 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque chuva da 2ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor).

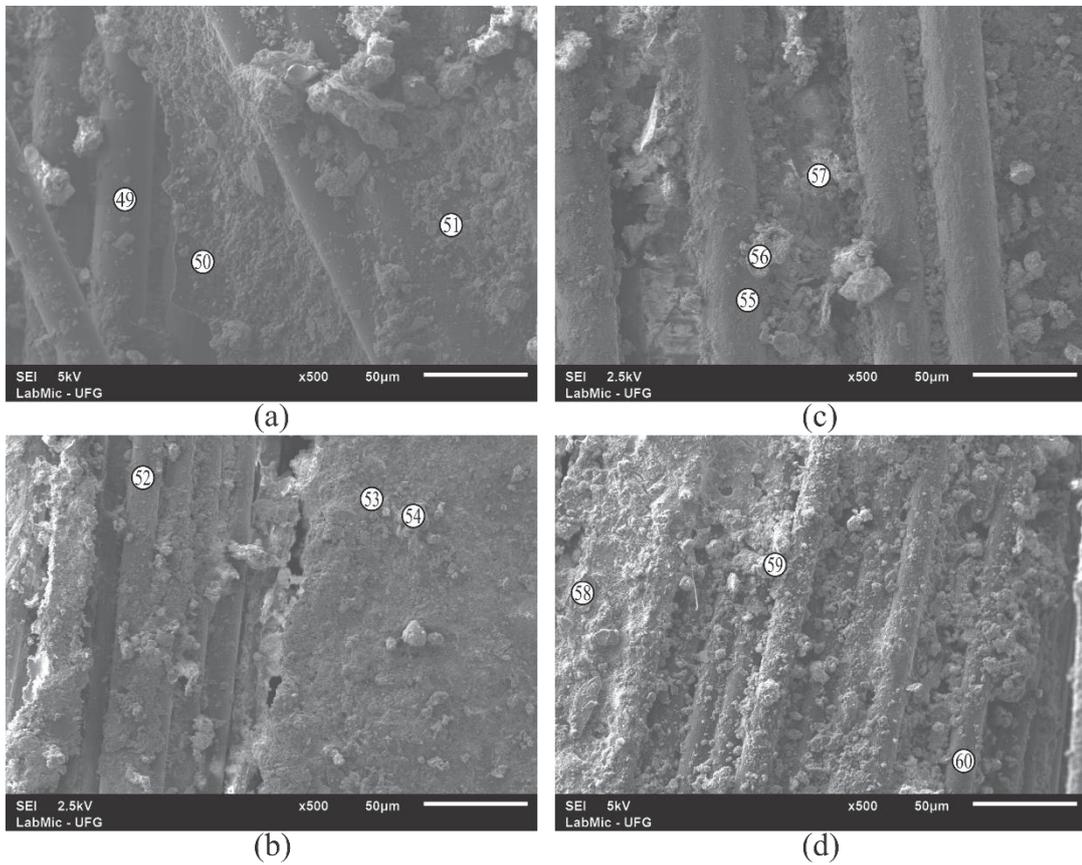
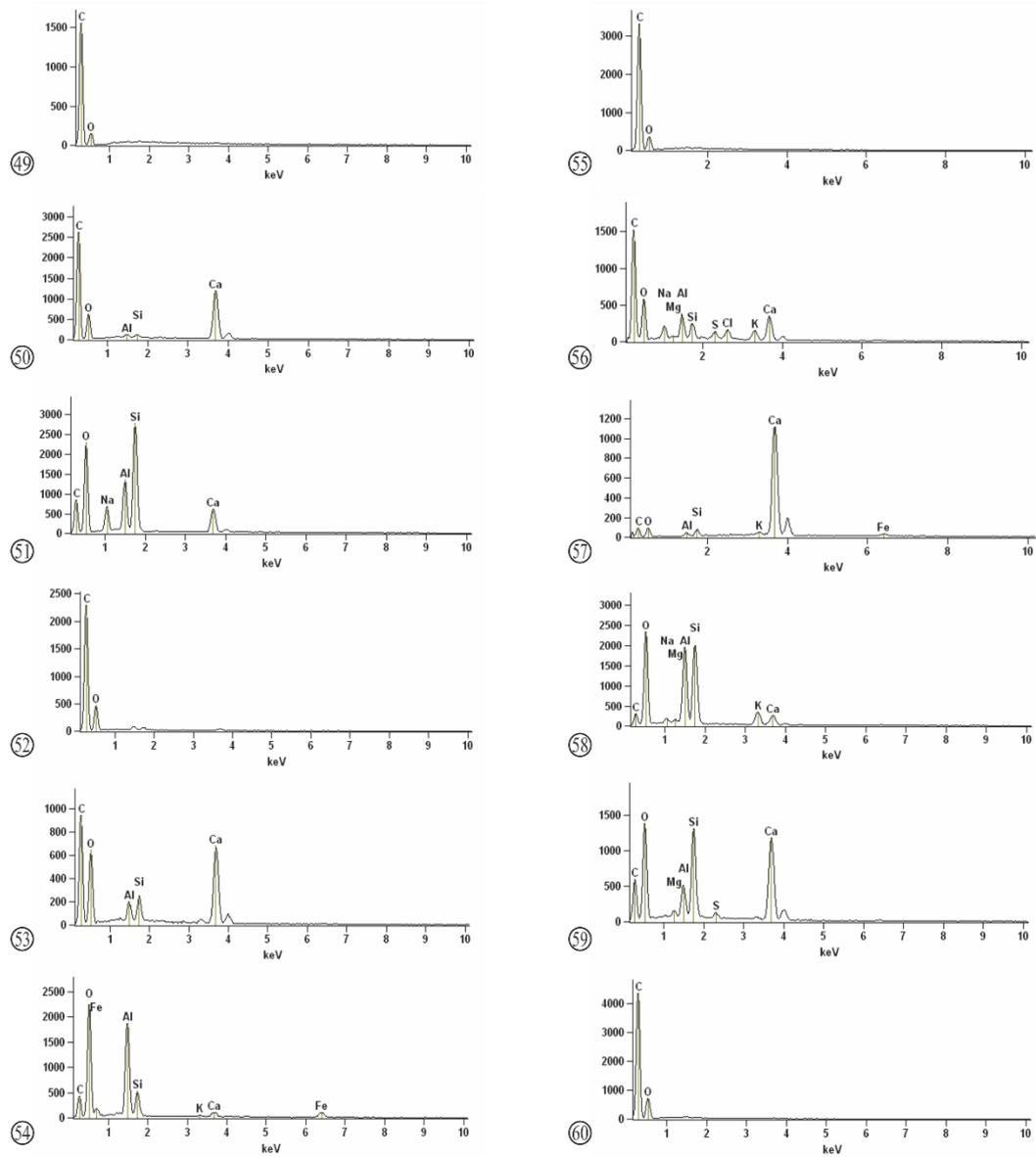


Figura 4.28 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque chuva da 2ª exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor).



Não foi possível perceber elementos e morfologias diferentes dos cenários já analisados nas amostras do tanque inundado (pontos 61 a 72) e seco (pontos 73 a 84) da 2ª exumação. A Figura 4.29 ilustra a morfologia e os pontos analisados e a Figura 4.30 ilustra os espectros dos respectivos pontos analisados.

Figura 4.29 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque inundado da 2ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor).

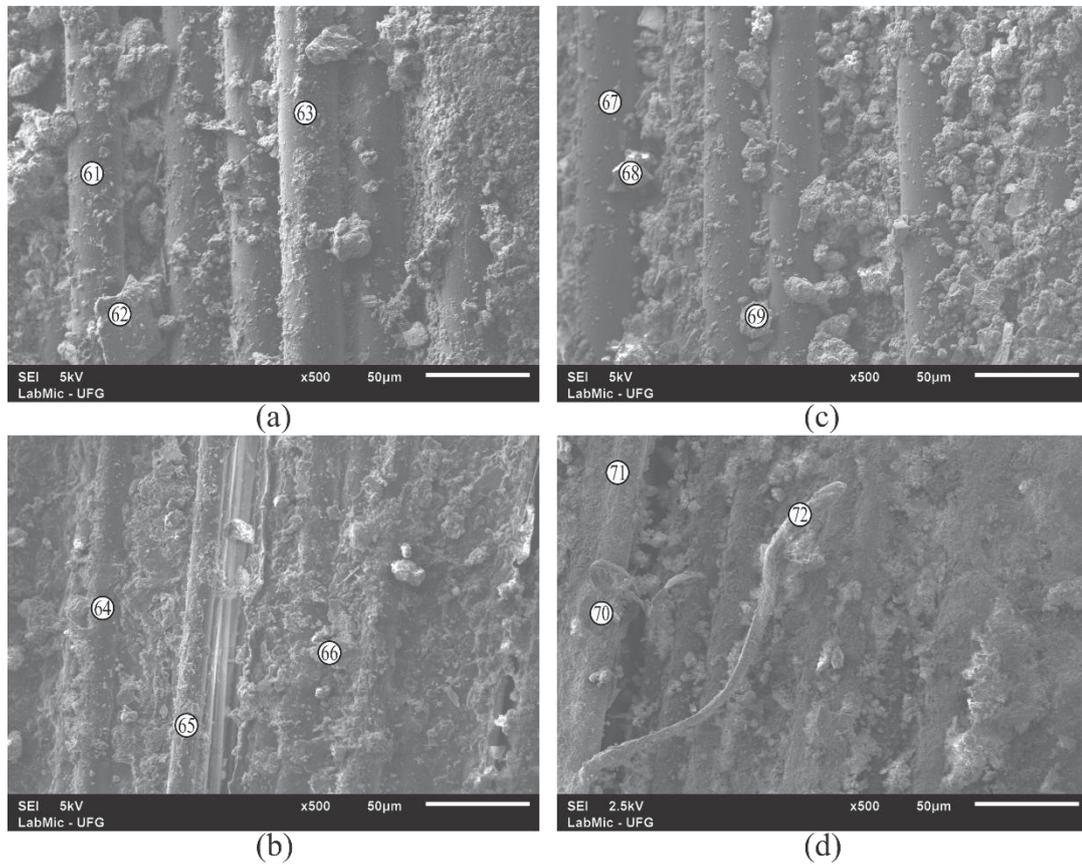
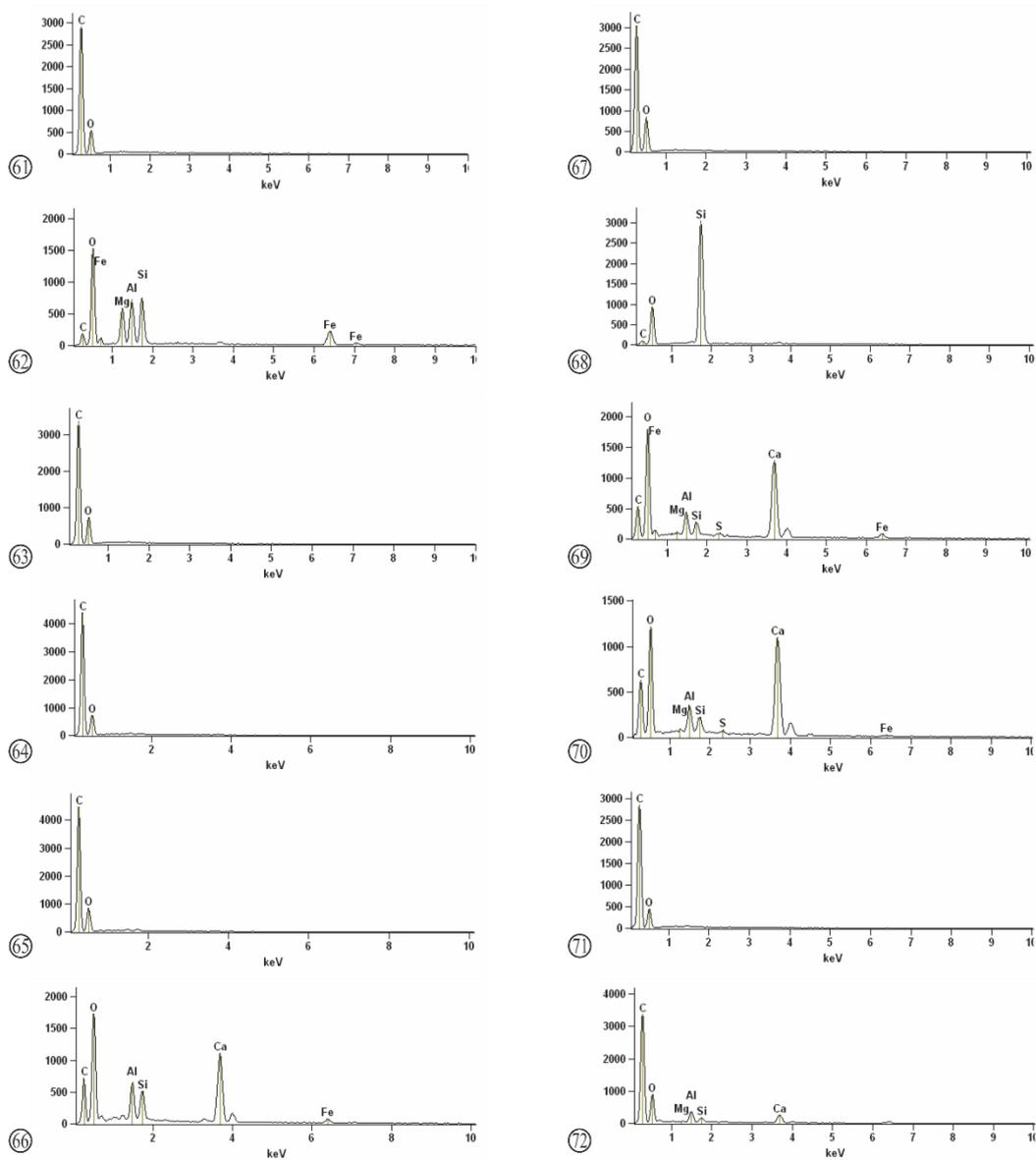


Figura 4.30 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque inundado da 2º exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor).



Não foi possível observar nas amostras do tanque seco nenhum ponto nas análises de EDX com características diferentes daquelas analisadas anteriormente em outros tanques. Foi possível observar diversas agregações com características elementares já analisadas anteriormente. A Figura 4.31 ilustra a morfologia e os pontos analisados e a Figura 4.32 ilustra os espectros dos respectivos pontos analisados para o tanque seco.

Figura 4.31 – Imagens de MEV com aumento de 500 vezes em amostras tanque seco da 2ª exumação contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) PET sem danificação de instalação; (b) PVA sem danificação de instalação; (c) PET com danificação de instalação; e, (d) PVA com danificação de instalação. (Próprio autor).

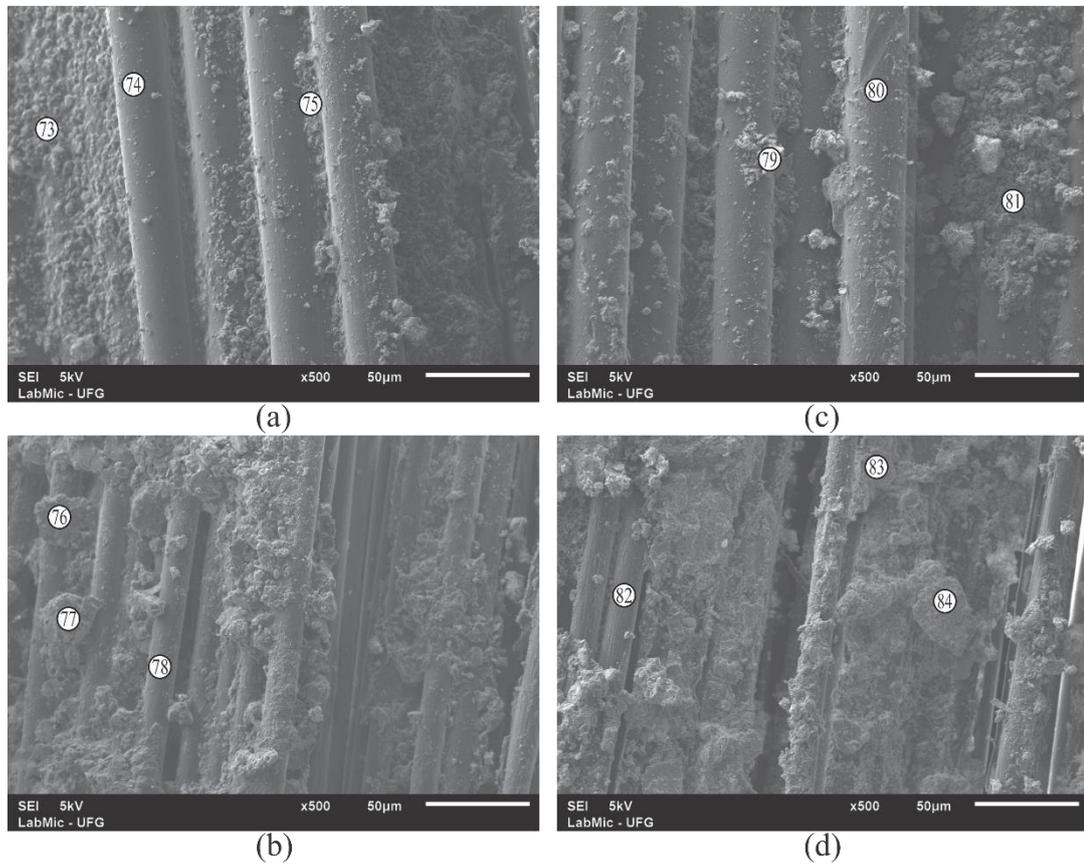
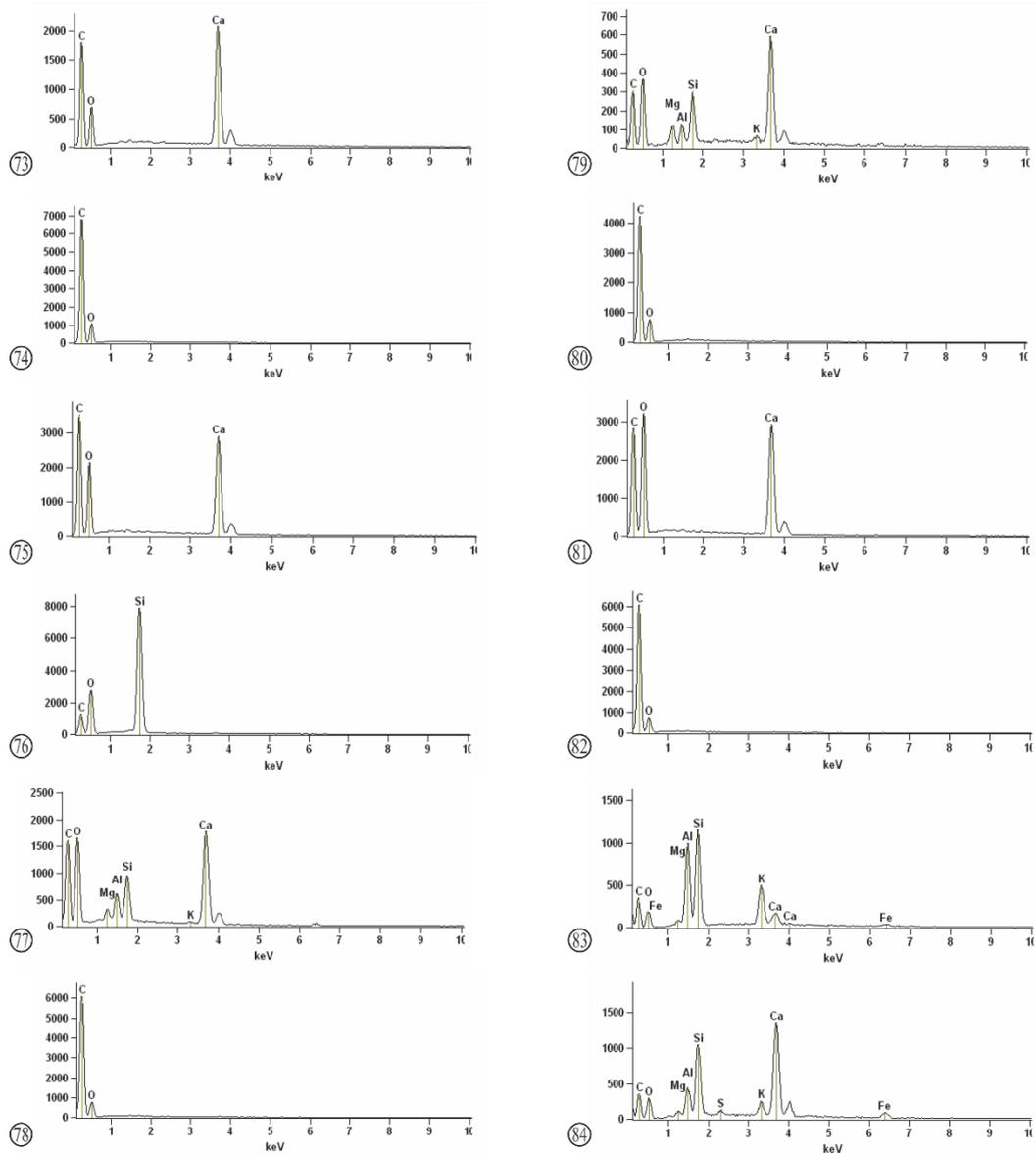


Figura 4.32 – Gráficos das análises de EDX das amostras tanque seco da 2ª exumação contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor).



#### 4.6.4 Geogrelhas com etringita

Os resultados de MEV apontaram a morfologia de etringita –  $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]_2 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – nas seguintes amostras: i) PET sem danos do tanque inundado da 2ª exumação e ii) PVA com danos do tanque chuva da 1ª exumação. Com a realização do ensaio EDX, observou-se, no ponto 85, o espectro de uma etringita e, possivelmente, o magnésio é resultado da agregação em que a “agulha” de etringita está apoiada. O ponto 86 ilustra o espectro do polímero a um aumento de 5000 vezes. O ponto 87,

88 e 89 ilustram o espectro de uma etringita. A Figura 4.33 ilustra a morfologia e os pontos analisados e a Figura 4.34 ilustra os espectros dos respectivos pontos analisados.

Não foi possível determinar como a etringita apareceu nas geogrelhas. Pode-se creditar duas prováveis hipóteses: i) a etringita já estava no RCD-R (presente na fração de partículas de concretos e argamassas) e foi lixiviada em direção as geogrelhas na medida em que os tanques eram inundados ou esvaziados para a realização do enchimento ou das exumações (o que explica porque não se verificou a presença de etringita nas amostras do tanque seco) ou; ii) devido ao fluxo de resíduos e minerais dos RCD-R em direção as geogrelhas durante o processo de coleta de água, o que poderia causar a formação da etringita visualizada em pontos específicos das geogrelhas.

Figura 4.33 – Imagens de MEV com aumento de 1000 e 5000 vezes em amostras que evidenciaram a existência de etringita contendo os pontos analisados por EDX. As amostras são respectivamente: (a) aumento de 1000 vezes em amostra de PET sem danificação de instalação do tanque inundado da 2ª exumação; (b) aumento de 1000 vezes em amostra de PVA com danificação de instalação do tanque chuva da 1ª exumação; (c) aumento de 5000 vezes em amostra de PET sem danificação de instalação do tanque inundado da 2ª exumação; (d) aumento de 5000 vezes em amostra de PVA com danificação de instalação do tanque chuva da 1ª exumação. (Próprio autor).

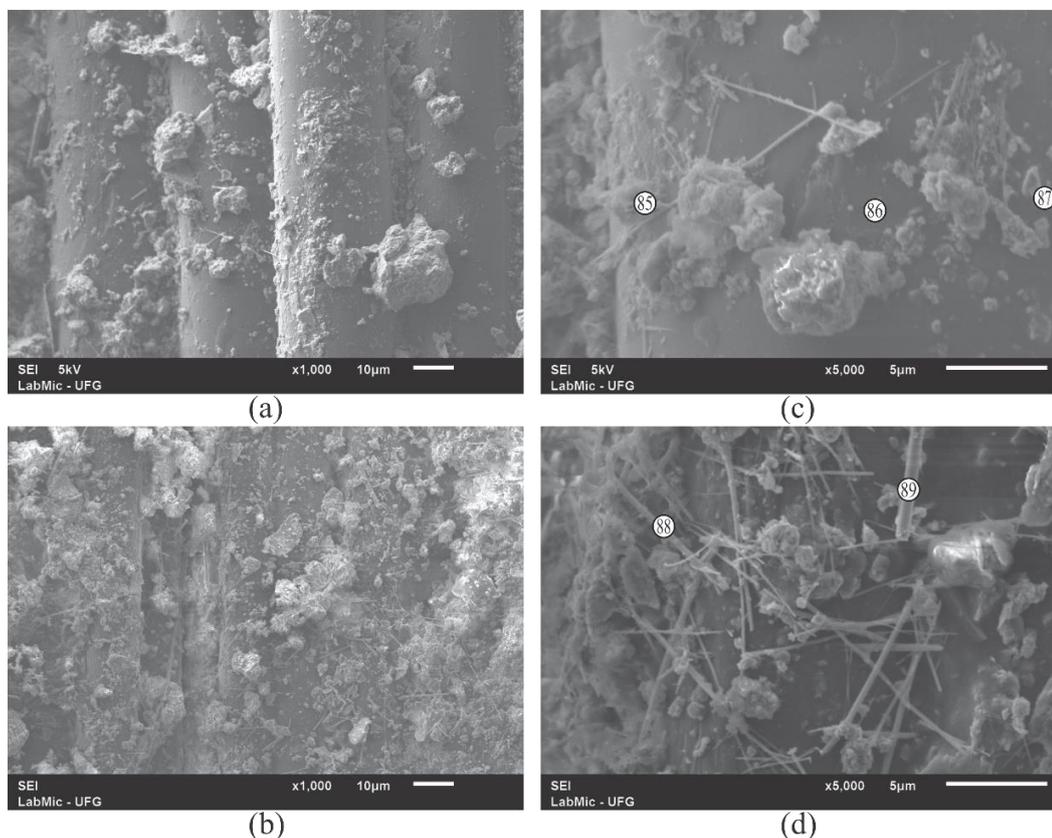
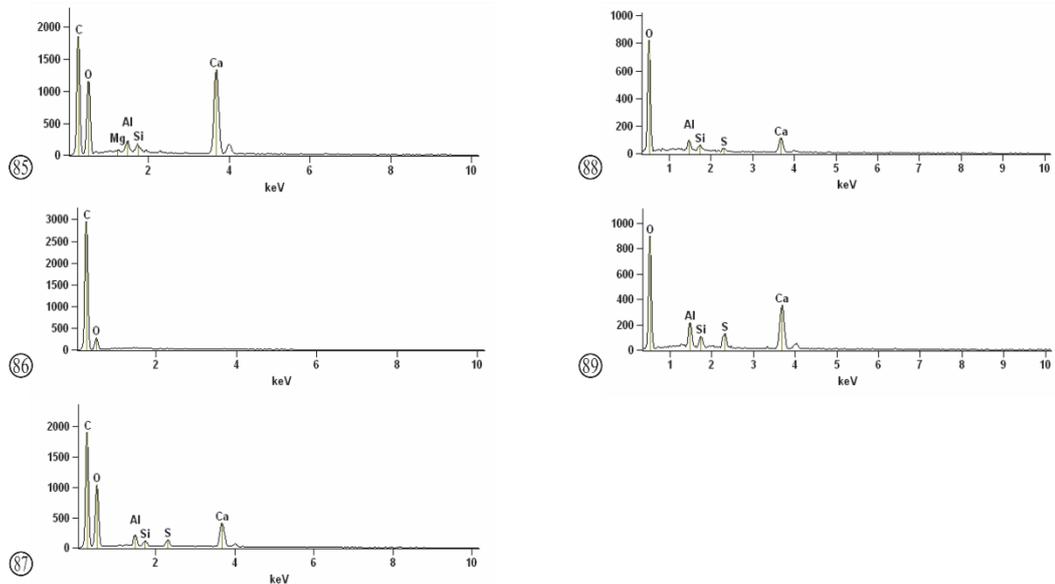


Figura 4.34 – Gráficos das análises de EDX das amostras que evidenciaram a existência de etringita contendo respectivos pontos analisados. (Próprio autor).



## 4.7 DANOS NAS GEOGRELHAS – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

### 4.7.1 Geogrelhas de PET (GGPET)

A análise dos ensaios de resistência à tração revelaram que as tensões de ruptura das geogrelhas de poliéster (GGPET) apresentaram um nível de confiança de 98% e que estavam contidas dentro de um intervalo de confiança de 24,1 kN/m a 30,7 kN/m. Os resultados da amostra virgem sem danos e virgem danificada evidenciou que não houve danos relacionados a perda de tração decorrentes do lançamento do RCD-R de uma altura de 2,0 metros.

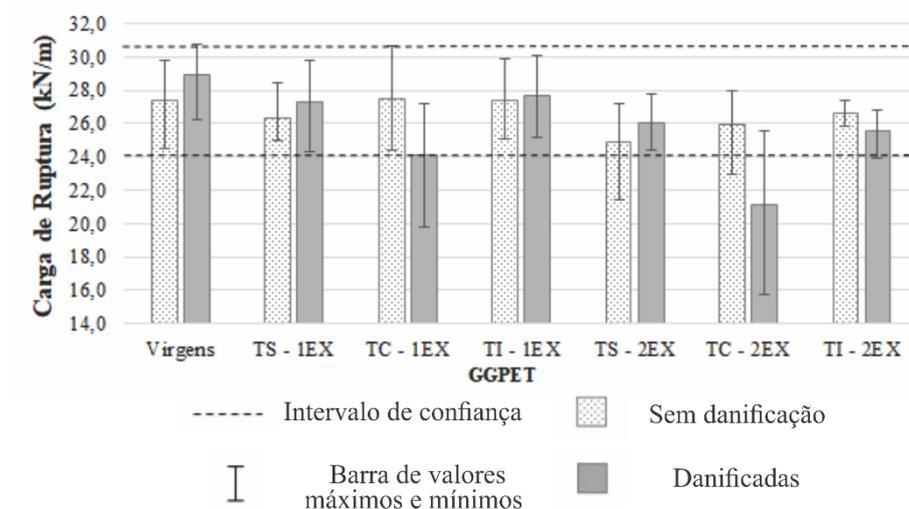
A análise dos resultados do tanque seco mostrou que as amostras sem danos e danificadas reduziram gradualmente seus valores médios de resistência à tração na 1ª exumação (90 dias) e na 2ª exumação (180 dias); no entanto, permaneceram dentro do intervalo de confiança calculado a partir dos resultados das amostras virgens sem danos (logo, FR = 1,0).

A análise dos resultados para o tanque chuva mostrou uma redução das resistências à tração das amostras sem danos apenas na 2ª exumação (180 dias), permanecendo dentro do intervalo de confiança considerado; por outro lado, a amostra danificada revelou uma redução de resistência à tração na 1ª exumação (90 dias) (FR = 1,0) e na 2ª exumação (180 dias) (FR= 1,294).

As amostras do tanque inundado (sem danos e danificadas) apresentaram redução gradual da resistência à tração ao longo do período analisado, sendo que a amostras danificadas mostraram uma maior redução de resistência, porém com os valores médios analisados ainda permanecendo dentro do intervalo de confiança dado pela amostra virgem sem danos.

É possível verificar que as amostras do tanque chuva (expostas a ação da água das chuvas) perderam maiores parcelas de resistência, enquanto, as amostras do tanque inundado e seco reduziram suas resistências com próximas intensidades. Portanto, é possível analisar que o lançamento do RCD-R (altura 2,0m) sobre as amostras, apesar de não reduzir imediatamente a resistência das GGPET, pode ter causado danos nas proteções que acabaram acelerando a degradação das geogrelhas ao longo do período analisado. Observou-se também que a água da chuva mostrou-se mais agressiva às GGPET do que a água do reservatório utilizada no tanque inundado. A Figura 4.35 mostra o gráfico da carga na ruptura para os cenários analisados.

Figura 4.35 – Resultados da tensão de ruptura das geogrelhas de PET. (Próprio autor).



Quanto à deformação das GGPET na ruptura, verificou-se possuir um nível de confiança de 96%, com um intervalo de confiança sendo definido com valores de deformação variando de

7,6% a 9,8%. Os resultados da amostra virgem sem danos e virgem danificada mostraram que não houve grandes variações da deformação, sendo observado seus valores dentro do intervalo de confiança da amostra virgem sem danos, logo a danificação decorrente do lançamento do RCD-R de uma altura de 2,0 metros não alterou essa propriedade.

Os resultados do tanque seco (1ª e 2ª exumações) mostraram que as amostras sem danos exumadas não alteraram seus valores médios de deformação em relação à amostra virgem, aumentando, contudo, os seus valores máximos e mínimos. Por outro lado, as amostras danificadas apresentaram acréscimo dos valores médios de deformação apenas na 2ª exumação (180 dias), verificando também um aumento gradual dos valores máximos e mínimos ao longo das exumações (1ª e 2ª). As amostras do tanque seco (1ª e 2ª exumações) permaneceram dentro do intervalo de confiança da amostra virgem sem danos (FR iguais a 1,0).

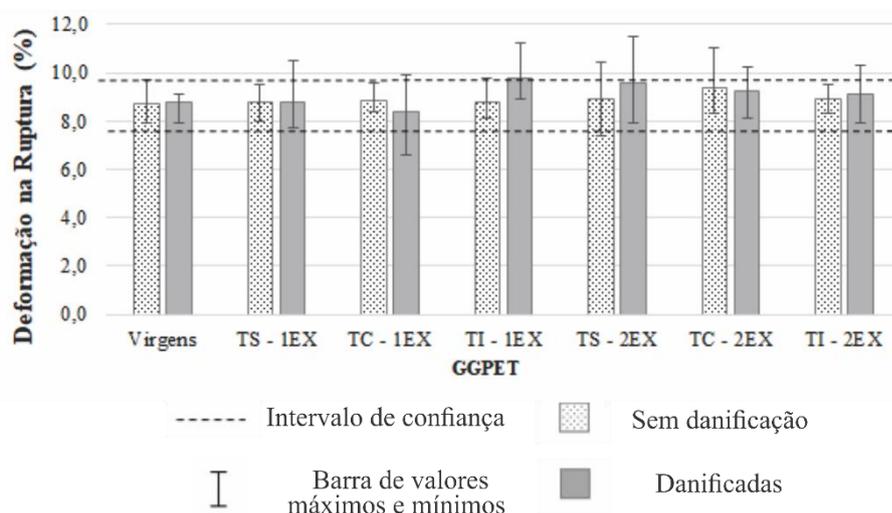
A análise dos resultados do tanque chuva mostrou que as amostras sem danos aumentaram gradualmente as deformações na 1ª exumação (90 dias) e na 2ª exumação (180 dias), porém ainda mantendo seus valores médios dentro do intervalo de confiança da amostra virgem sem danos. As amostras danificadas apresentaram redução da deformação média na 1ª exumação e acréscimo na 2ª exumação (180 dias), no entanto, os valores médios permaneceram dentro do intervalo de confiança.

Os resultados do tanque inundado mostraram que para a amostra sem danos não houve variações significativas da deformação na 1ª exumação (90 dias) e na 2ª exumação (180 dias) em relação aos valores médios apresentados pelas amostras virgens (sem danos e danificada). Para as amostras danificadas, verificou-se um acréscimo de deformação na 1ª exumação (90 dias), resultando num FR igual a 0,890; no entanto, a amostra da 2ª exumação (180 dias) revelou um valor médio muito próximo (pequeno acréscimo) em relação às amostras virgens (sem danos e danificada).

A comparação dos resultados encontrados nos tanques não possibilitou avaliar com precisão a interferência da condição de saturação e do tipo de água (reservatório ou chuva) na deformação da GGPET. Diante da observação da maioria dos valores médios dentro da variabilidade da amostra virgem, pode-se afirmar que até a 2ª exumação (180 dias) a água não foi um fator capaz de alterar as deformações das GGPET. No entanto, para uma análise mais

apurada sobre esse fator, deve-se expor a GGPET a períodos mais longos de contato. A Figura 4.36 mostra o gráfico da deformação na ruptura para os cenários analisados.

Figura 4.36 – Resultados da deformação na ruptura das geogrelhas de PET. (Próprio autor).



As amostras GG PET, nas análises da força a 2% de deformação, revelaram um nível de confiança 98%, com um intervalo de confiança variando de 6,2 kN/m a 9,2 kN/m. O resultado da amostra virgem danificada mostrou que houve um pequeno acréscimo do valor médio dessa propriedade em relação à amostra virgem sem danos; porém, mantendo-se dentro do intervalo de confiança (amostra virgem sem danos). Verificou-se que os valores mínimos dessas amostras (sem danos e danificada) mantiveram-se próximos; contudo, os valores máximos apresentaram valores bastante distintos, sendo o da amostra danificada maior que a amostra sem danos. Tendo em vista que, dentre os corpos de prova danificados (lançamento do RCD-R de 2,0 m de altura), apenas um corpo de prova apresentou valor acima do limite superior, pode-se afirmar que esse processo (danificação) não repercutiu numa mudança significativa dessa propriedade.

Os resultados do tanque seco mostraram que as amostra sem danos (1ª e 2ª exumações) apresentaram comportamento distintos, com uma pequena redução dessa propriedade (valores médios) na 1ª exumação e um pequeno acréscimo na 2ª exumação. Verificou-se que os valores máximos e mínimos (1ª exumação) mantiveram-se dentro do intervalo de confiança da amostra virgem sem danos; no entanto, na 2ª exumação (180 dias) os valores máximos e mínimos extrapolaram os referentes ao intervalo de confiança (amostra virgem sem danos). Os resultados das amostras danificadas mostraram uma pequena redução do valor médio dessa

propriedade para a 1ª exumação (90 dias), com esse mesmo valor sendo observado na 2ª exumação (180 dias). Verificou que nessa condição de saturação (tanque seco) todas as amostras apresentaram valores médios dentro do intervalo de confiança considerado.

Os resultados do tanque chuva mostraram que para as amostras sem danos houve um pequeno acréscimo o valor médio da força a 2% de deformação na 1ª exumação (90 dias) em relação à amostra virgem; havendo uma redução do valor médio dessa propriedade na 2ª exumação (180 dias), também em relação à amostra virgem. Apesar de todos os valores médios permanecerem dentro do intervalo de confiança considerado (amostra virgem sem danos), a análise dos valores máximos e mínimos mostrou que para a 2ª exumação (180 dias) alguns corpos de prova ficaram abaixo do limite mínimo. Os resultados da amostra danificada mostraram que o valor médio na 1ª exumação (90 dias) ficou acima do limite superior (FR igual a 0,769); já na 2ª exumação (180 dias) ficou abaixo do limite inferior (FR igual a 1,322).

Os resultados do tanque inundado mostraram que para as amostras sem danos houve um pequeno acréscimo do valor médio da força a 2% de deformação na 1ª exumação (90 dias), com uma redução dessa propriedade na 2ª exumação (180 dias). Apesar de todos os valores médios permanecerem dentro do intervalo de confiança considerado (amostra virgem sem danos), os valores de máximos e mínimos mostraram que, para a 1ª exumação (90 dias), alguns corpos de prova ficaram acima do limite superior. Os resultados das amostras danificadas mostraram que houve uma redução na 1ª exumação (90 dias) e na 2ª exumação (180 dias), sendo que o valor médio ficou fora (abaixo) do intervalo de confiança (FR igual a 1,336).

Diante do observado, pode-se afirmar que as amostras do tanque seco sofreram poucas alterações dos valores médios da força a 2% de deformação ao longo do tempo de contato com o RCD-R. Para a maioria das amostras dos tanques chuva e inundado, em relação às amostras virgens (sem danos e danificadas), apresentaram acréscimo da força a 2% de deformação na 1ª exumação (90 dias) e redução dessa propriedade na 2ª exumação (180 dias), demonstrando a influência da condição de saturação. A Figura 4.37 mostra os valores obtidos para as forças a 2% de deformação, e a Tabela 4.15 resume os valores dos FR calculados das GGPET para cada cenário analisado.

Figura 4.37 – Resultados do módulo da força a 2% de deformação das geogrelhas de PET. (Próprio autor).

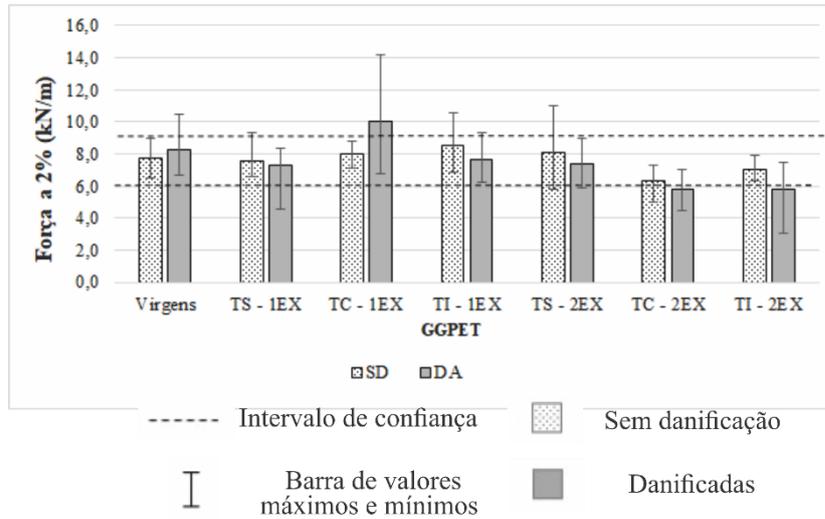


Tabela 4.15 – Resultados dos fatores de redução e dos fatores de ganho das geogrelhas de PET. (Próprio autor).

IDENTIFICAÇÃO GGPET		Cargas de ruptura (p=98%)	Deformação (p=96%)	Força a 2% (p=98%)
Virgens	Virgem sem danos	-	-	-
	Virgem danificada	1,000	1,000	1,000
1º exumação	Tanque seco sem danos	1,000	1,000	1,000
	Tanque seco danificada	1,000	1,000	1,000
	Tanque chuva sem danos	1,000	1,000	1,000
	Tanque chuva danificada	1,000	1,000	<b>0,769</b>
	Tanque inundado sem danos	1,000	1,000	1,000
	Tanque inundado danificada	1,000	<b>0,890</b>	1,000
2º exumação	Tanque seco sem danos	1,000	1,000	1,000
	Tanque seco danificada	1,000	1,000	1,000
	Tanque chuva sem danos	1,000	1,000	1,000
	Tanque chuva danificada	<b>1,294</b>	1,000	<b>1,322</b>
	Tanque inundado sem danos	1,000	1,000	1,000
	Tanque inundado danificada	1,000	1,000	<b>1,336</b>

#### **4.7.2 Geogrelhas de PVA (GGPVA)**

A análise dos ensaios de resistência à tração revelou que as tensões de ruptura das geogrelhas de álcool polivinílico (GGPVA) apresentaram um nível de confiança de 98% e que estavam contidas dentro de um intervalo de confiança de 22,9 kN/m a 29,8 kN/m. Os resultados da amostra virgem sem danos e da virgem danificada evidenciou que houve uma redução da resistência relacionado à perda de tração decorrente do lançamento do RCD-R (altura de 2,0 metros), no entanto, como o valor médio ainda contido dentro do intervalo de confiança da amostra virgem sem danos. Contudo o intervalo de valores máximos e mínimos da amostra virgem danificada mostrou uma maior variação.

A análise dos resultados do tanque seco mostrou que as amostras sem danos reduziram gradualmente seus valores médios de resistência à tração na 1ª exumação (90 dias) e na 2ª exumação (180 dias); com os fatores de redução para a 1ª exumação (90 dias) e para a 2ª exumação (180 dias) iguais a 1,184 e 1,324, respectivamente. As amostras danificadas também reduziram gradualmente seus valores de resistência; com a amostra da 1ª exumação (90 dias) mantendo-se dentro do intervalo de confiança, e a da 2ª exumação (180 dias) apresentando-se abaixo do limite inferior do intervalo de confiança (FR = 1,264).

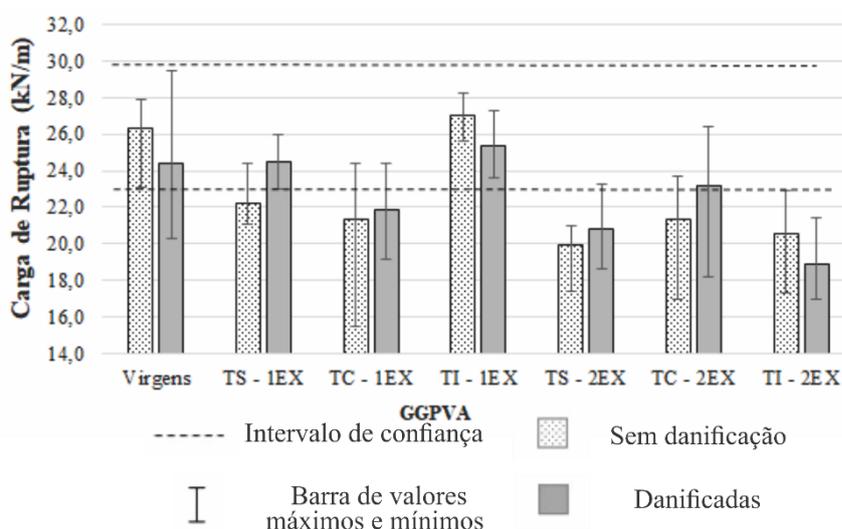
A análise dos resultados do tanque chuva mostrou que a amostra sem danos reduziu seu valor médio na 1ª exumação (90 dias) (FR=1,237); com a amostra da 2ª exumação (180 dias) apresentando o mesmo valor de fator de redução (FR=1,237). Verificou-se que, na 2ª exumação, a variação dos valores dos corpos de prova diminuiu em relação à 1ª exumação. Por outro lado, a amostra danificada reduziu seu valor médio na 1ª exumação (90 dias) (FR=1,205), e apresentou uma menor redução de resistência na 2ª exumação (180 dias), permanecendo o seu valor médio dentro do intervalo de confiança considerado (FR = 1,0).

A análise dos resultados do tanque inundado mostrou que a amostra sem danos apresentou aumento de resistência à tração na 1ª exumação (90 dias); contudo, permanecendo dentro do intervalo de confiança considerado (virgem sem danos). Já a amostra da 2ª exumação (180 dias) mostrou uma redução de resistência, com FR igual a 1,284. Em relação às amostras danificadas, observou-se que na 1ª exumação o valor médio ficou muito próximo aos das amostras virgens, permanecendo dentro do intervalo de confiança considerado; porém a

amostra danificada da 2ª exumação (180 dias) apresentou redução da resistência, sendo seu FR igual a 1,392.

Analisando os resultados encontrados nos tanques, verificou-se que na maioria dos cenários houve redução gradual de resistência à tração das GGPVA ao longo da 1ª exumação (90 dias) e da 2ª exumação (180 dias), sendo que na 2ª exumação os valores médios de cada um dos 3 (três) tanques permaneceram dentro de uma faixa de valores iguais cerca de 20 a 23 kN/m. No entanto, devido às grandes variações dos valores corpos de prova ensaiados (valores de máximos e mínimos), encontrados na maioria dos cenários, a análise dos resultados revela a necessidade de atentar para o estado físico inicial das geogrelhas (GGPVA). A Figura 4.38 mostra o gráfico da carga na ruptura para os cenários analisados.

Figura 4.38 – Resultados da tensão de ruptura das geogrelhas de PVA. (Próprio autor).



Os resultados das deformações mostraram que as GGPVA apresentaram um nível de confiança de 95%, com um intervalo de confiança sendo definido com valores de deformação variando de 4,3% a 5,0%. Os resultados das amostras virgem sem danos e danificada evidenciaram que não houve variações dos valores médios devido ao processo de danificação (lançamento do RCD-R de uma altura de 2,0 metros), verificando somente o aumento das variações dos corpos de prova ensaiados conforme ilustra os valores de máximos e mínimos (Figura 4.39).

A análise dos resultados do tanque seco mostrou, quando comparados com as amostras virgens, que a amostra sem danos apresentou um grande acréscimo de deformação na 1ª

exumação (90 dias) ( $FR = 0,666$ ), sendo esse maior que o acréscimo de deformação na 2ª exumação (180 dias) ( $FR = 0,844$ ). Nas amostras danificadas ficou evidenciado o mesmo comportamento mostrado pelas amostras sem danos, sendo observado um valor de  $FR$  de  $0,466$ , na 1ª exumação (90 dias); e um valor de  $FR$  igual a  $0,772$ , na 2ª exumação (180 dias). Ressalta-se que a grande variação dos valores dos corpos de provas (valores máximos e mínimos), a qual, no caso da 1ª exumação (90 dias), foi devido ao valor dado por apenas um dos corpos de prova, revela a sensibilidade dos ensaios para a determinação desta propriedade (deformação na ruptura). Essa ocorrência sugere que o emprego de um número maior de corpos de prova seja mais adequado para tal análise.

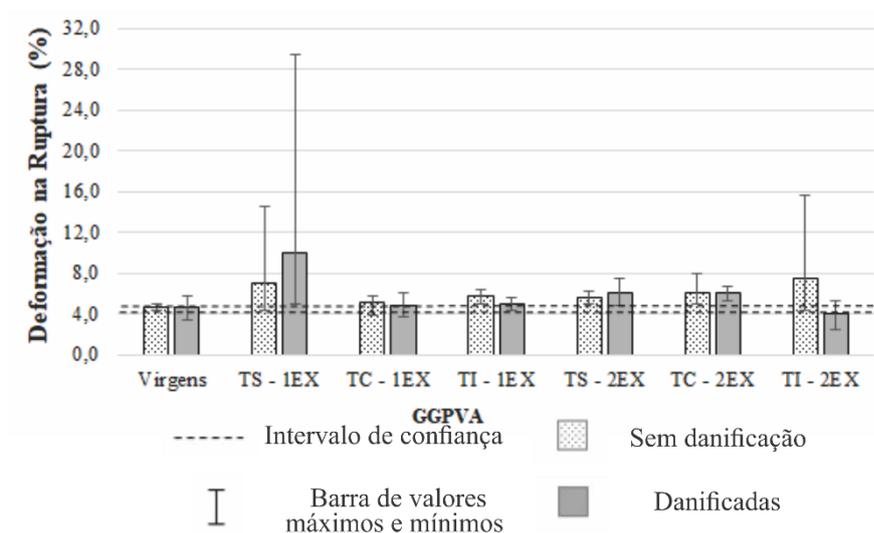
Os resultados do tanque chuva mostraram que, para as amostras sem danos, houve um aumento gradual de seus valores médios de deformação na 1ª exumação (90 dias) ( $FR = 0,914$ ) e na 2ª exumação (180 dias) ( $FR = 0,774$ ). A análise dos resultados das amostras danificadas evidenciou que na 1ª exumação (90 dias) o valor médio permaneceu dentro do intervalo de confiança considerado ( $FR = 1,0$ ), mas observou-se que alguns corpos de prova apresentaram valores acima do limite superior do intervalo de confiança considerado (virgem sem danos). Já na 2ª exumação (180 dias), houve um aumento da deformação acima do limite superior do intervalo de confiança ( $FR = 0,769$ ).

A análise dos resultados do tanque inundado mostrou que as amostras sem danos apresentaram um acréscimo gradual da deformação ao longo do tempo de contato - 1ª exumação (90 dias), com  $FR = 0,801$ ; e 2ª exumação (180 dias), com  $FR = 0,630$ . No entanto, que essa última apresentou uma grande variação dos valores apresentados nos corpos de prova ensaiados, mostrada pelos valores de máximos e mínimos. As amostras danificadas apresentaram um aumento de deformação na 1ª exumação (90 dias) ( $FR = 0,925$ ) e uma redução da deformação na 2ª exumação (180 dias) ( $FR = 1,177$ ).

Verificou-se que, apesar de grandes variações dos valores dos corpos de prova (máximos e mínimos), verificados em alguns cenários, existe uma tendência de que a deformação das GGPVA aumente com o tempo, o que revela que a água foi um fator que aumentou os valores da deformação ao longo do tempo. Nesse contexto, pode-se verificar que a água do reservatório mostrou-se mais agressivas na GGPVA do que a água da chuva. Esse resultado, junto com os observados nas amostras danificadas demonstram, mais uma vez, a sensibilidade

dessa propriedade. A Figura 4.39 mostra o gráfico da deformação na ruptura para os cenários analisados.

Figura 4.39 – Resultados da deformação na ruptura das geogrelhas de PVA. (Próprio autor).



A análise dos ensaios de resistência à tração revelou que os resultados da força a 2% de deformação das GGPVA apresentaram um nível de confiança de 98% e que o intervalo de confiança mostrou valores de 9,8 kN/m a 12,2 kN/m. Os resultados da amostra virgem sem danos e danificada evidenciaram que a média dos valores permaneceram dentro do intervalo de confiança da amostra virgem sem danos, sendo que a amostra virgem danificada apresentou aumento da força quando comparada à amostra sem danos. A variação entre alguns corpos de prova da amostra virgem danificada, mostrou que alguns corpos de prova apresentaram valores acima do limite superior do intervalo de confiança.

Os resultados do tanque seco mostraram que as amostras sem danos exumadas em relação à amostra virgem também sem danos apresentaram uma redução gradual da força a 2% de deformação na 1ª exumação (90 dias) (FR = 1,127) e na 2ª exumação (180 dias) (FR = 1,524). O mesmo comportamento foi verificado nas amostras danificadas exumadas em relação à amostra virgem danificada, com a 1ª exumação apresentando valor de FR = 1,0 e a 2ª exumação (180 dias) revelando valor de FR = 1,348. Verificou-se que a redução de força a 2% de deformação ao longo do tempo de contato aconteceu de forma proporcionalmente semelhante, independentemente do cenário de danificação.

A análise dos resultados para o tanque chuva mostrou comportamento similar ao observado no tanque seco: uma redução gradual da força a 2% de deformação das amostras sem danos na 1ª exumação (90 dias) (FR = 1,155) e na 2ª exumação (180 dias) (FR = 1,396). As amostras danificadas valores de FR igual a 1,0 (1ª exumação, 90 dias) e FR igual a 1,348 (2ª exumação, 180 dias). Verificou-se que as alterações de força a 2% de deformação nas amostras danificadas (comparação entre danificadas virgens e danificadas exumadas), ao longo do tempo de contato, foram maiores que aqueles observados nas amostras sem danos.

No tanque inundado, a análise dos resultados mostrou que as amostras sem danos exumadas em relação à amostra virgem sem danos, apresentou alteração da força a 2% de deformação na 1ª exumação (90 dias) ainda se mantendo dentro do intervalo de confiança considerado (FR = 1,0). No entanto, como mostram os valores de máximos e mínimos, houve corpos de prova que ficaram abaixo do limite inferior do intervalo de confiança considerado (virgem sem danos); e na 2ª exumação (180 dias) houve uma maior alteração de força a 2% de deformação (FR = 1,322). As amostras danificadas apresentaram uma modificação gradual da força a 2% de deformação ao longo do tempo de contato, com FR = 1,230 na 1ª exumação (90 dias), e FR = 1,351 na 2ª exumação (180 dias).

Verificou-se que para todos os cenários analisados houve alteração gradual ao longo do período de contato. Notou-se que, no tanque seco, independentemente da condição de danificação, as alterações da força a 2% de deformação ocorreram aproximadamente iguais ao longo da exposição da GGPVA ao RCD-R. Verificou-se nas amostras sem danos, quando comparada a amostra virgem sem danos, que a condição de saturação evidenciou influência nas alterações da força a 2% de deformação das GGPVA uma vez que o tanque seco teve maior redução dessa propriedade. Contudo, as amostras danificadas, quando comparadas a amostra virgem danificada, mostraram que a condição de saturação não influenciou essa propriedade. Nos tanques com água (tanque chuva e tanque inundado), a alteração da força das amostras danificadas ocorreram de forma mais pronunciada quando comparadas as amostras sem danos. Considerando apenas os valores médios das amostras (sem danos e danificadas) encontrados na 2ª exumação (180 dias), dos tanques com água (tanque chuva e tanque inundado), verificou-se que a origem da água não interferiu nesse parâmetro das GGPVA. A Figura 4.40 mostra o gráfico da força a 2% de deformação, e a Tabela 4.16 resume os dados encontrados dos FR calculados das GGPVA para cada cenário analisado.

Figura 4.40 – Resultados da força a 2% de deformação das geogrelhas de PVA. (Próprio autor).

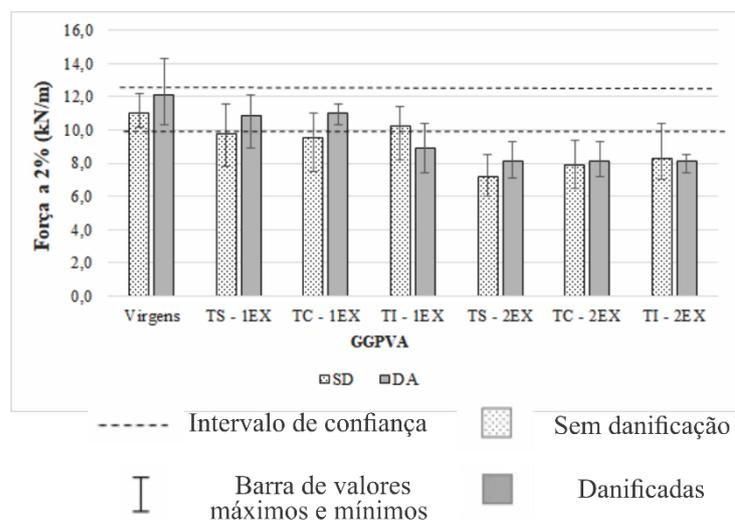


Tabela 4.16 – Resultados dos fatores de redução e dos fatores de ganho das geogrelhas de PVA/PA. (Próprio autor).

IDENTIFICAÇÃO GGPVA		Cargas de ruptura (p=98%)	Deformação (p=95%)	Força a 2% (p=98%)
Virgens	Virgem sem danos	-	-	-
	Virgem danificada	1,000	1,000	1,000
1º exumação	Tanque seco sem danos	<b>1,184</b>	<b>0,666</b>	<b>1,127</b>
	Tanque seco danificada	1,000	<b>0,466</b>	1,000
	Tanque chuva sem danos	<b>1,237</b>	<b>0,914</b>	<b>1,155</b>
	Tanque chuva danificada	<b>1,205</b>	1,000	1,000
	Tanque inundado sem danos	1,000	<b>0,801</b>	1,000
	Tanque inundado danificada	1,000	<b>0,925</b>	<b>1,230</b>
2º exumação	Tanque seco sem danos	<b>1,324</b>	<b>0,844</b>	<b>1,524</b>
	Tanque seco danificada	<b>1,264</b>	<b>0,772</b>	<b>1,348</b>
	Tanque chuva sem danos	<b>1,237</b>	<b>0,774</b>	<b>1,396</b>
	Tanque chuva danificada	1,000	<b>0,769</b>	<b>1,348</b>
	Tanque inundado sem danos	<b>1,284</b>	<b>0,630</b>	<b>1,322</b>
	Tanque inundado danificada	<b>1,392</b>	<b>1,177</b>	<b>1,351</b>

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Este trabalho buscou investigar as alterações em geogrelhas mantidas em contato com o RCD-R em três condições de saturação e duas condições de integridade (dano mecânico). Para isso, analisou-se as características geotécnicas, químicas e de composição de um RCD-R produzido na Região Metropolitana de Goiânia. Além dessas caracterizações, verificou-se as variabilidades dos parâmetros i) dos materiais tomados como de controle, ii) do material de preenchimento dos experimentos e iii) do material coletado na 2ª exumação (180 dias). O monitoramento dos valores de pH foi realizado ao longo de todo o experimento, enquanto que a análise dos líquidos extraídos nas exumações (1ª exumação, 90 dias; e 2ª exumação, 180 dias) contou também com a determinação de metais, cloretos, fluoretos e alcalinidade. De modo a investigar as eventuais alterações nas estruturas das geogrelhas, utilizou-se técnicas de microscopia antes e depois de cada exumação. As propriedades de resistência, de deformação na ruptura e da força a 2% de deformação foram obtidas por meio de ensaios de resistência à tração.

#### **5.1 CONCLUSÕES**

De posse dos resultados encontrados e análises realizadas, pode-se concluir que:

- Os resultados das amostras de controle (5 amostras) revelaram que o RCD-R nomeado BGS fino apresentou, na análise de distribuição granulométrica, valores de coeficiente de variação (CV) bastante distintos em função dos diâmetros de grãos analisados. No entanto, esses resultados mostraram-se aceitáveis quando comparados a outros estudos que também caracterizaram os RCD-R geotecnicamente. Os resultados de massa específica dos sólidos mostraram baixa variabilidade, com valores desse parâmetro sendo comparáveis aos de solos granulares; verificou-se que o material apresentou comportamento não plástico. O ensaio de composição gravimétrica revelou que essas amostras eram constituídas predominantemente por partículas de concreto e

argamassas e “solo” (material passante na peneira de abertura de 4,8 mm). Os resultados de pH mostraram que essas amostras possuíam extratos aquosos alcalinos;

- a comparação dos resultados das amostras de preenchimento com os das amostras coletadas na 2ª exumação revelou que não houve diferenças significativas dos valores de pH, na massa específica e limites de consistência. No entanto, observou-se alterações nas curvas granulométricas dos distintos materiais (preenchimento e exumados). Verificou-se partículas de maiores dimensões (agregações) no RCD-R exposto à chuva e em regime de secagem e umedecimento (tanque chuva); enquanto que, no tanque que possibilitou o RCD-R ser mantido em contato constante com a água do reservatório (tanque inundado), observou-se um incremento do percentual de partículas de menores dimensões. O efeito do contato com a água pôde ser confirmado com os resultados do tanque sem água (tanque seco), uma vez que as partículas do RCD-R nessa condição praticamente não apresentaram mudanças, mostrando uma distribuição granulométrica semelhante à do material no momento do preenchimento. Vale ressaltar que isso afetou diretamente os resultados do ensaio de composição gravimétrica;
- os resultados de pH e temperatura, analisados ao longo de todo o período experimental (180 dias), mostrou que para esse período, os extratos aquosos de ambos os tanques (tanque inundado e tanque chuva) não apresentaram grandes variações de pH entre si, com valores máximos e mínimos médios diários variando de 10,65 a 12,34; os valores máximos e mínimos médios diários de temperatura variaram de 23,7°C a 30,1°C. Verificou-se que houve pequenos aumentos dos valores de pH e de temperatura medidos, à medida que as leituras eram realizadas em tubos mais baixos. Quando confrontado com os dados de temperatura obtidos pela estação meteorológica, verificou-se que o valor médio de temperatura do ar medido das 10:00h às 17:00h, foi cerca de 2,6°C maior que a observada nos experimentos (tanque chuva e tanque inundado);
- as imagens de MEV mostraram que as amostras virgens (GGPET e GGPVA) já apresentavam trechos sem cobertura do material de proteção. Os ensaios com as geogrelhas exumadas mostraram a presença de impregnações de RCD-R nas amostras, sem evidências de aumento dessas impregnações ao logo do tempo de pesquisa. O

tanque seco apresentou menores quantidades de material impregnado quando comparado aos outros tanques (tanque chuva e tanque inundado). Especificamente sobre as amostras de GGPVA do tanque seco, observou-se que o processo de danificação (lançamento do RCD-R de altura de 2,0m) aumentou os sinais de danos da geogrelha apenas na 1ª exumação. Observou-se, em 2 elementos analisados (GGPVA, na 1ª exumação do tanque chuva; e GGPET, na 2ª exumação do tanque inundado), o surgimento de materiais cuja morfologia pareceu ser de etringita;

- os ensaios de EDX com as amostras virgens mostraram que os polímeros das fibras das geogrelhas (PET e PVA) apresentaram gráficos com grandes picos apenas para os elementos carbono (C) e oxigênio (O). As proteções de ambas as geogrelhas apresentaram além desses elementos, pico para o elemento cálcio (Ca). Verificou-se que as análises de EDX realizadas foram suficientes para determinar a composição das agregações; contudo, não foi possível identificar o material impregnado. Tendo em vista a composição gravimétrica do RCD-R, a análise dos elementos apresentados nos gráficos do EDX indica a possível presença de caulinita, gipsita, calcita, dolomita, goethita e gibbsita. Os materiais que morfologicamente indicavam ser de uma etringita (visualizados por MEV) foram confirmados pelo EDX;
- As análises nos líquidos extraídos dos tanques nas exumações mostraram que, embora os procedimentos de obtenção da água dos tanques não tenham sido os previstos para classificar o RCD-R em ‘inerte’ ou ‘não inerte’, a as presenças de ferro (1ª exumação) e de alumínio (1ª e 2ª exumações) acima dos limites permitidos pelo Anexo G (NBR 10004/2004) classificariam o RCD-R como resíduo não inertes;
- os ensaios de resistência à tração na GGPET evidenciaram que o processo de danificação (lançamento de RCD-R de uma altura de 2,0 m) não reduziu imediatamente a sua resistência. No entanto, tal processo causou danos na proteção, o que refletiu na redução de resistência à tração dos corpos de prova exumados. Para o período analisado, a água da chuva mostrou-se mais agressiva na GGPET em relação à água do reservatório. Ressalta-se que o cenário em que houve a danificação e o contato com a água da chuva foi o único que apresentou valor de FR maior que 1,0;

- ao analisar as deformações na ruptura das GGPET, verificou-se que não foi possível avaliar com precisão a interferência da condição de saturação e da danificação (lançamento de RCD-R de uma altura de 2,0 m). Portanto para uma análise mais apurada, deve-se expor as GGPET a períodos mais longo de contato;
- a análise dos valores de força a 2% de deformação das GGPET revelou que a presença da água e a danificação (lançamento de RCD-R de uma altura de 2,0 m) influenciaram significativamente esse parâmetro. As amostras danificadas do tanque chuva (água de chuva) e do tanque inundado (água do reservatório) apresentaram redução da força a 2% de deformação; o que revela que esse parâmetro foi afetado pela presença de água, independentemente do seu tipo (água de chuva ou água do reservatório). Desse modo, a sinergia entre a danificação e o contato com a água nas GGPET influenciou a redução de força a 2% de deformação;
- os ensaios de resistência à tração das GGPVA evidenciaram que as amostras da 2ª exumação mostraram que a maioria delas apresentaram FR maior que 1,0 (exceto amostra danificada do tanque chuva). A observação de grandes variações de valores máximos e mínimos, na maioria dos cenários, demonstrou a importância de atentar para o estado físico inicial dessas geogrelhas;
- ao analisar as deformações na ruptura das GGPVA, verificou-se a tendência de aumento de valores de deformação ao longo do período analisado. Por outro lado, a danificação pouco ou nada afetou essa propriedade. Assim, a presença da água afetou de maneira mais expressiva essa propriedade, sendo que a água do reservatório (tanque inundado) mostrou-se mais agressiva que a água da chuva (tanque chuva). Chama-se a atenção para a grande variação dos intervalos dados pelos valores limites (máximos e mínimos) em alguns cenários analisados (por exemplo, as amostras sem danos e danificadas do tanque seco da 1ª exumação; e a amostra sem danos do tanque inundado da 2ª exumação), o que revelou uma grande sensibilidade de tal propriedade; e
- verificou-se que a condição de saturação influenciou as amostras sem danos em relação à força a 2% de deformação das GGPVA, visto que as maiores alterações foram observadas no tanque seco. Por outro lado, as amostras danificadas

apresentaram maiores parcelas de reduções de força em relação às amostras sem danos; com a redução de força sendo aproximadamente iguais para os três tanques.

Com base nos resultados neste estudo, pode-se afirmar que os RCD-R (BG-Fino) que as análises apresentaram parâmetros que demonstraram o potencial uso desses materiais em obras geotécnicas. Observou-se também que valores de fator de redução (FR) obtidos poderiam ser facilmente considerados na fase de projeto de estruturas de solo reforçado (ESR) com tais geossintéticos e material de preenchimento. Dessa, o uso de RCD-R e geossintéticos apresenta-se como uma interessante opção mesmo em diversas condições de obra. Assim, o emprego desse novo compósito surge como uma medida capaz de colaborar com a redução da exploração de recursos naturais e atender as recomendações que visam implementar o desenvolvimento sustentável na Indústria da Construção Civil.

## **5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Diante dos resultados e conclusões obtidas neste trabalho, sugere-se para pesquisas futuras:

- Analisar a redução de resistência de geogrelhas devido a danos químicos causados por RCD-R, substituindo os tipos de polímeros utilizados;
- analisar a redução de resistência de geogrelhas devido a danos químicos causados por um RCD-R com composição distinta (exemplo: brita reciclada);
- construir experimento de campo semelhante com a finalidade de analisar quimicamente o extrato aquoso dos RCD-R;
- construir experimento semelhante com os mesmos materiais utilizando equipamento de compactação empregado em obras reais (tipo sapo), para verificar o efeito de eventuais danos desse procedimento;
- realizar experimento semelhante permitindo a condição contínua de drenagem de um tipo qualquer de água; e
- aumentar o número de amostras em cada cenário, de modo a utilizar a distribuição normal.

## REFERÊNCIAS

- AKERS, S. A. S., STUDINKA, J. B.; MEIER, P.; DOBBT, M. G.; JOHNSONT, D. J.; HISAKA, J. Long term durability of PVA reinforcing fibres in a cement matrix. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**. v. 11, n. 2, p. 79-91, 1989.
- ANGULO, S; ULSEN, C.; JOHN, V. M.; KAHN, H.; CINCOTTO, M. A. Chemical mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. **Waste Management (Elmsford)**, v. 29, p. 721-730, 2009.
- APHA; AWWA; WEF. Standard methods for examination of water and wastewater. 22th ed.; Washington DC; 2012.
- ARAÚJO NETO, O. G. **Ensaio de arrancamento de geogrelha com equipamento de pequenas dimensões aplicado a compostos de resíduos de construção**. 2016. 96f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, 2017.
- ARULRAJAH, A., PIRATHEEPAN, J., DISFANI, M., BO, M. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 25, n.8, p. 1077–1088, 2013.
- ASAKURA, H. Sulfate and organic matter concentration in relation to hydrogen sulfide generation at inert solid waste landfill site – Limit value for gypsum. **Waste Management**. v. 43, p. 328 - 334. 2015.
- ASAKURA, H.; WATANABE, Y.; ONO, Y.; YAMADA, M.; INOUE, Y.; ALFARO, A.M. Characteristics of fine processed construction and demolition waste in Japan and method to obtain fines having low gypsum component and wood contents. **Waste Management & Research**, v. 28, n. 7, p. 634-646. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6508**. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984, 8 p.
- ABNT\_\_\_\_\_. **NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004, 71 p.
- ABNT\_\_\_\_\_. **NBR 10005**. Procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004, 16 p.
- ABNT\_\_\_\_\_. **NBR 10006**. Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos. NBR 10.006. Rio de Janeiro, 2004, 3 p.
- ABNT\_\_\_\_\_. **NBR 6408**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016, 5 p.
- BARBOSA, K. R. M. **Degradação de geogrelhas em estradas não pavimentadas executadas com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)**. 2017. 121f.

Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, 2017.

BARBUDO, A.; GALVÍN, A. P.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. R. Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Waste Management**, v. 32. p. 1229-1335. 2012.

BERG, R.R.; CHRISTOPHER; B.R., SAMTANI, N.C. **Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes**. Federal Highway Administration, USA. No. FHWA-NHI-10e024. 2009a.

BERNARDIN, A. M.; SILVA, M. J.; RIELLA, H. G. Characterization of cellular ceramics made by porcelain tile residues. **Materials Science & Engineering A**. v. 437, p. 226 – 225, 2006.

BS – British Standard (2010). **BS 8006**: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.

BURGOYNE, C. J.; MERRI, A. L. On the hydrolytic stability of polyester yarns. **Journal of Materials Science**. v. 42, p. 2867-2878. 2007.

CARDOSO, R. A. **Cadastro geotécnico dos solos finos lateríticos para fins de pavimentação no município de Goiânia-GO**. 2010. 185f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010. Goiânia, 2010.

CARNEIRO, J. R. C. **Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – A importância da incorporação de aditivos químicos**. 2009. 534f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, 2009.

CARNEIRO, J. R.; ALMEIDA, P. J.; LOPES, M. L. Some synergisms in laboratory degradation of a polypropilene geotextile. **Construction and Building Materials**, v. 73, p.586-591. 2014.

COELHO, E. E.; PEREIRA, L. A; NOZAKI, N. K. S.; PASQUALETTO, A. Análise da acidez da chuva no município de Goiânia, GO. In: Antônio Pasqualetto. (Org.). **Gestão das águas**. Goiânia: Editora da UCG, p. 109-120, 2005.

COLLARES, A. C. Z. B.; VILAR, O. M. The influence of some chemical properties of soaking liquids on the collapse of tropical soils. In: Second Pan-American Conference on Unsaturated Soils, 2018, Dallas, TX. **Proceeding of the Second Pan-American Conference on Unsaturated Soils**. New York: ASCE, 2018. v. 1. p. 398-407.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Presidente: Jose Carlos Carvalho. Brasília, 2002.

CONAMA\_\_\_\_\_. **Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004**. Altera o inciso IV do art. 3º da Resolução CONAMA nº 307/02, de 5 de julho de 2002, incluindo amianto na classe de resíduos perigosos. Presidente: Marina Silva. Brasília, 2004.

CONAMA\_\_\_\_\_. **Resolução nº 431, de 25 de maio de 2011**. Altera o art. 3º da Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, estabelecendo nova classificação para o gesso. Presidente: Izabela Teixeira. Brasília, 2011.

CONAMA\_\_\_\_\_. **Resolução nº 448, de 18 de janeiro de 2012.** Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 10º, 11º da Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Presidente: Izabela Teixeira. Brasília, 2012.

CONAMA\_\_\_\_\_. **Resolução nº 469, de 30 de julho de 2015.** Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002 que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Presidente: Izabela Teixeira. Brasília, 2015.

CORCHRAN, K.; TOWSEND, T.; REINHART, D.; HECK, H. Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition: Case study for Florida, US. **Waste Management.** v. 27, p. 921 – 931, 2007.

DUVALL, D. E. Impact of product structure on the stability and durability of coated poly(ethylene terephthalate) geogrids. **Geotextiles and Geomembranes,** v. 13, n. 3, p.133-145, 1994.

EEC Council Directive **98/83/EC** of 3<sup>rd</sup> November 1998. On the quality of Water Intended for Human Consumption, Off J. L330./0512/98.

ELIAS, V.; FISHMAN, K. L. CHRISTOPHER, B. R.; BERG, R. R. **Corrosion/Degradation of Soil Reinforcements for Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes.** Federal Highway Administration, USA. No. FHWA-NHI-09-087. 2009b.

ELIAS, V.; SALMAN, A.; GOULIAS, D. The effect of pH, resin properties, and manufacturing process on laboratory degradation of polyester geosynthetics. **Geosynthetics International.** v. 5, n 5, p. 459-490, 1998.

EMC/UFG. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás – Estação Meteorológica. 2019. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/sfvemcufg/weather-station>>. Acesso em: 08 de abril de 2019.

FLEURY, M. P. **Resistência de geogrelhas após danos mecânicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados.** 2018. 160f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2018. Goiânia, 2018.

FLEURY, M. P.; NETO, N.S.; SANTOS, E.C.G. Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na Região Metropolitana de Goiânia-GO. In: Simpósio de prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro Oeste (GEOCENTRO), 2017, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABMS, 2017. p. 634-639.

FREMPONG, E. M.; YANFUL, E. K. Tropical soils-acid mine drainage interactions: Breakthrough curves and some transport parameters. **Journal of Environmental Engineering.** v. 133, n. 7, p. 733 – 741, 2007.

GLASS, G. K.; PAGE, C. L.; SHORT, N. R. Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars. **Corrosion Science.** v. 32, n. 12, p. 1283 – 1294, 1991.

GREENWOOD, J. H.; CURSON, A. Life Prediction of the geogrids by three different methods. **Geotextiles and Geomembranes.** 2012.

GREENWOOD, J. H.; SCHROEDER, H. F.; VOSKAMP, W. **Durability of Geosynthetics.** CUR Building & Infrastructure. 2012.

HSUAN, Y. G; SCHROEDER, H. F.; ROWE, R. K. MULLER, W.; GREENWOOD, J.; CAZZUFFI, D.; KOERNER, R. M. Long-term performance and lifetime prediction of the geosynthetics. In: 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference, 2008, Edinburgh. **Anais...** EuroGeo4, 2008. p. 1-40.

- HU, L.; DU, Y.; LONG, Y. Relationship between H<sub>2</sub>S emissions and the migration of sulfur-containing compounds in landfill sites. **Ecological Engineering**. v. 106, p. 17-23. 2017.
- HUFENUS, R.; RÜEGGER, R.; FLUM, D.; STERBA, I. J. Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, p. 401-424, 2005.
- JAILOUX, J-M.; NAIT-ALI, K. L.; FREITAG, N. Exhaustive long-term study on hydrolysis of high-tenacity polyester – 10 year results. In: 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference, 2008, Edinburgh. **Anais...** EuroGeo4, 2008. p. 1-6.
- JANG, Y.; TOWNSEND, T. Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines. **Advances in Environmental Research**. v. 5, p. 203-217, 2001.
- KAY, D.; BLOND, E.; MLYNAREK, J. Geosynthetics durability: a polymer chemistry issue. In: 57 Canadian Geotechnical Conference, 2004, Quebec. **Anais...** Quebec: SAGEOS, 2004. p. 01-14.
- LAFITI, N.; EISAZADEH, A.; MARTO, A.; MEEHAN, C. L. Tropical residual soil stabilization: A powder form material for increasing soil strength. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 827-836, 2017.
- LEE, S.; XU, Q.; TOWNSEND, T. G.; CHADIK, P.; BITTON, G. Reduced sulfur compounds in gas from construction and demolition debris landfills. **Waste Management**. v. 26, p. 526-533. 2006.
- LEFLAIVE, E. Durability of geotextiles: the French experience. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 7, p. 23-31, 1988.
- LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização E Classificação Dos Resíduos De Construção Civil Da Cidade De Fortaleza (CE). **Eng. Saint Ambient**. 169-176. 2013.
- LIU, Z.; HU, W.; HOU, L.; DENG, D. Effect of carbonation on physical sulfate attack no concrete by Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. **Construction and Building Materials**. v. 193, p. 211 – 220, 2018.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72, 2016.
- MAPA FÁCIL. Mapa da cidade de Goiânia georreferenciado pela prefeitura de Goiânia. 2019. Disponível em: <<http://portalmapa.goiania.go.gov.br/mapafacil/#>>. Acesso em: 16 de abril de 2019.
- MASCARENHA, M. M. A.; CORDÃO NETO, M. P.; MATOS, T. C.; CHAGAS, J. V. R.; REZENDE, L. R. Effects of the addition of dihydrate phosphogypsum on the characterization and mechanical behavior of lateritic clay. **Soils & Rocks**, v. 41, p. 157-170, 2018.
- MURRAY, R. T.; FARRAR, D.M. Temperature distributions in reinforced soil retaining walls. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 7, p. 33-50, 1988.
- NISHIKAWA, T.; SUZUKI, K.; ITO, S. Decomposition of synthesized ettringite by carbonation. **Cement and Concrete Research**. v. 22, p. 6 – 14, 1992.
- NISHIYAMA, M. YAMAMOTO, R.; HOSHIRO, H. Long-term durability of Kuralon (PVA fiber) in alkaline condition. 10<sup>th</sup> International Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference, 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo, IIBCC, 2006, p. 120-134.
- PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 832 – 838, 2010.

- PAULA, A. M. V.; PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L. Efeito da danificação durante a instalação no comportamento mecânico de longo prazo de uma geogrelha tecida em PET. In: 3º Seminário Português sobre Geossintéticos, 2009, Coimbra. **Anais...** Coimbra: FCNAUP, 2009. p. 319-329.
- PETER, M. A.; MUNTEAN, A.; BÖHM, M. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**. v. 38, p. 1385 – 1393, 2008.
- RAMBALDI, E.; ESPOSITO, L.; TUCCI, A.; TIMELLINI, G. Recycling of polish porcelain stoneware residues in ceramic tiles. **Journal of European Ceramic Society**. v. 27, p. 3509 – 3515, 2007.
- RAMOS, B. F. **Indicadores De Qualidade Dos Resíduos Da Construção Civil Do Município De Vitória-ES**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Vitória. 2007.
- SANTOS, E. C. G. **Aplicação De Resíduos De Construção E Demolição Reciclados (RCD-R) Em Estruturas De Solo Reforçado**. 2007. 173f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.
- \_\_\_\_\_. **Avaliação Experimental de Muros Reforçados Executados com Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) e Solo Fino**. 2011. 214f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2011.
- SANTOS, E. C. G.; PALMEIRA, E. M.; BATHURST, R. J. Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation. **Geotextiles and Geomembranes**, v.39, p. 9-19, 2013.
- \_\_\_\_\_. Performance of two geosynthetic reinforced walls with recycled construction waste backfill and constructed on collapsible ground. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 4, p.256-269, 2014.
- SANTOS, E. C. G.; VILAR, O. M.; ASSIS, A. P. Statistical Analysis of Geotechnical Parameters of Recycled Construction and Demolition Waste (RCDW). In: 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, 2009, Alexandria - Egito. **Anais...** 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, 2009. p. 112-115.
- SCHAEFER, C. O.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Estudo do comportamento de lixiviação de argamassas produzidas com agregado reciclados. **Exacta**, v.5, n.2, p.243-252, 2007.
- SEGRESTIN, P.; JAILOUX, J-M. Temperature in soils and its effect on the ageing of synthetic materials. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 7, p. 51-69, 1988.
- STOOK, K.; TOLAYMAT, T.; WARD, M.; DUBEY, B.; TOWNSEND, T.; SOLO-GABRIELE, H.; BITTON, G. Relative leaching and aquatic toxicity of pressure-treated wood products using batch leaching tests. **Environmental Science Technology**. v. 39, p. 155-163. 2005.
- TOWNSEND, T. G.; JANG, Y.; THURN, L. G. Simulation of Construction and Demolition Waste Leachate. **Journal of Environmental Engineering**. 1999.
- ULSEN, C.; KAHN, H.; Angulo, S. C.; JOHN, V. M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. **Revista da Escola de Minas (Impresso)**, v. 63, p. 339-346, 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **SW-846**. Test Method 9045D: Soil and Waste pH. SW-846, 2004, 5p.

VERTEMATTI, J. C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

VIEIRA, C. S., PEREIRA, P. M.; LOPES, M. L. Recycled Construction and Demolition Wastes as filling material for Geosynthetic Reinforced Structures. Interface Properties. **Journal of Cleaner Production**. 2016.

VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Damage induced by recycled construction and demolition wastes on the short-term tensile behaviour of two geosynthetics. **Transportation Geotechnics**, v. 4, p. 64-75, 2015a.

VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 103, p. 192-204, 2015b.

VISSER, J. H. M. Influence of the carbon dioxide concentration on the resistance to carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 67, p. 8 – 13, 2014.

XU, Q.; TOWNSEND, T. Factors affecting temporal H<sub>2</sub>S emission at construction and demolition (C&D) debris landfills. **Chemosphere**, v. 96, p. 105-111. 2014.

ZIEGLER, M. Application of Geogrid Reinforced Constructions: History, Recent and Future Developments. **Procedia Engineering**, v. 172, p.42-51, 2017.